



Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Förderkennzeichen 3708 95 303
UBA-FB 001401

Ermittlung von Ressourcenschonungs- potenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung

von

Georg Schiller, Clemens Deilmann

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Dresden

unter Mitarbeit von

Karin Gruhler, Patric Röhm

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Dresden

in Kooperation mit

Jan Reichenbach, Janett Baumann, Marko Günther

INTECUS GmbH - Abfallwirtschaft und umweltintegratives
Management, Dresden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4040.html> verfügbar. Hier finden Sie auch eine deutsche und eine englische Kurzfassung.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung,
Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie
Felix Müller, Susann Krause

Dessau-Roßlau, November 2010

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001401	2.	3.
4. Titel des Berichts Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung		
5. Autoren Schiller, Georg; Deilmann, Clemens; Reichenbach, Jan; Gruhler, Karin; Röhm, Patric; Baumann, Janett; Günther, Marko	8. Abschlussdatum Mai 2010	
	9. Veröffentlichungsdatum November 2010	
6. Durchführende Institution Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Weberplatz 1, 01217 Dresden INTECUS GmbH – Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management, Pohlandstraße 17, 01309 Dresden	10. UFOPLAN-Nr. FKZ 370895303	
	11. Seitenzahl: 191 (157+38)	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	12. Literaturangaben: 125	
	13. Tabellen und Diagramme: 91	
	14. Abbildungen: 49	
15. Zusätzliche Angaben: Abschlussbericht + Anlagen		
16. Kurzfassung Die Nutzung von Abfallstoffen leistet einen wichtigen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen. Dies gilt insbesondere bei einem hochwertigen Recycling, welches eine stoffliche Nutzung der Abfälle und die Herbeiführung möglichst enger Produktkreisläufe vorsieht. Mit der vorliegenden Studie wird das Ziel verfolgt, mittelfristig (2020) und langfristig (2050) zu erwartende Potenziale für ein hochwertiges Recycling mineralischer Bauabfallstoffe auszuloten. Speziell auf den Massenbaustoff Beton bezogen wird die Frage beantwortet, in welchem Umfang ein Recycling „aus dem Hochbau in den Hochbau“ erfolgen könnte und welche Potenziale zur Schonung primärer Baustoffressourcen dadurch erreichbar wären. Hauptgegenstand der dazu durchgeführten Betrachtungen sind die bei der Gebäudeherstellung im Beton eingesetzten Gesteinskörnungen. Hierzu erfolgt eine Massestrombilanzierung die darauf fokussiert, die zukünftig bereitstellbaren Mengen an geeigneten Bauabfallrezyklaten dem Bedarf an Betonzuschlagsstoffen und der hierbei durch Rezyklat substituierbaren Menge an entsprechenden Zuschlagsstoffen gegenüber zu stellen. Die Studie zeigt erhebliche räumliche und zeitliche Disparitäten im Anfall und Bedarf an RC-Material auf. Ausgehend hiervon werden Ansatzpunkte zur Stärkung eines hochwertigen Recyclings im Baubereich angesprochen und diskutiert.		
17. Schlagwörter Ressourcenschonungspotenzial, Hochwertiges Recycling, Bauabfälle, Regionalisierung		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001401	2.	3.
4. Report Title Determining Resource Conservation Potentials in the Recovery of Construction Waste and Formulating Recommendations on Their Use		
5. Autors Schiller, Georg; Deilmann, Clemens; Reichenbach, Jan; Gruhler, Karin; Röhm, Patric; Baumann, Janett; Günther, Marko	8. Report Date May 2010	
6. Performing Organisation Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Weberplatz 1, 01217 Dresden INTECUS GmbH – Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management, Pohlandstraße 17, 01309 Dresden, Germany	9. Publication Date November 2010	
	10. UFOPLAN-Ref. No. FKZ 370895303	
7. Sponsoring Agency Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	11. No. of Pages 191 (157+38)	
	12. No. of Reference 125	
	13. No. of Tables, Diagrams 91	
	14. No. of Figures 49	
15. Supplementary Notes: Final report + Annexes		
16. Abstract The utilization of waste materials represents an important contribution to the protection of natural resources. This especially holds true in regard to high-grade recycling, which envisions to use wastes as secondary material and to achieve the closest possible product cycles. The aim of the present study is to explore the medium (year 2020) and long-term (year 2050) expected potentials of high-grade recycling of mineral construction waste. The question answered here especially in regard to concrete as mass construction material concerns the extent to which the recycling loop "from building construction back into building construction" could be realized and what resource conservation potentials this would make accessible. The main subjects under consideration are the aggregates in the concrete used for constructing buildings. To this end, there is an accounting of the mass flow which focuses on juxtaposing the deployable, future amounts of suitable construction waste recycles with the need for aggregates and the amount of corresponding gravel materials that can be substituted by recycled building rubble. The study indicates huge regional and temporal disparities in the available amount of and the need for mineral recycled aggregate in the building sector. Hereupon, starting points aiming on strengthening a high-grade recycling in the construction industry are proposed and discussed.		
17. Keywords resource conservation potentials, high-grade recycling, construction waste, regionalization		
18. Price	19.	20.

Inhalt

INHALT	3
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS	9
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	14
KURZFASSUNG	16
ABSTRACT	26
1 EINFÜHRUNG	35
1.1 Zielstellung und begriffliche Einordnung	36
1.2 Forschungsansatz und Gliederung des Forschungsberichtes	37
1.3 Stoffstrommodell „Ressourcenschonungspotenzial“ – die Modellkomponenten im Überblick	38
1.3.1 Modellkomponente „Bestandsentwicklung“	39
1.3.2 Modellkomponente „Potenzielle Baustoffströme“	40
1.3.3 Modellkomponente „Potenzielle RC-Stoffströme“	41
1.3.4 Modellkomponente „RESPOT“	41
2 BESTANDSENTWICKLUNGSMODELL	43
2.1 Raumbezug als Grundlage der Regionalisierung	43
2.2 Modell zur Abbildung von Wohnungsbestandsveränderungen auf Raumtypenebene ...	46
2.2.1 Relevante Wohnungsbestandsveränderungen	47
2.2.2 Konsistenzmodell	48
2.2.3 Annahmengerüst zur Abbildung der Wohnungsbestandsentwicklung auf der Ebene von Raumtypen.....	50
2.2.4 Annahmengerüst zur Abbildung der Entwicklung der Gesamtnachfrage nach Wohnungen auf der Ebene von Raumtypen.....	53
2.2.5 Annahmengerüst zur Abbildung der Bestandsnutzung auf der Ebene der Raumtypen....	54
2.3 Modellierung von Veränderungen im Bauwerksbestand „Gewerbe“	60
2.3.1 Jüngste Entwicklungen im Gewerbebaubestand	60
2.3.2 Formulierung spezifischer Entwicklungskennziffern zur Abbildung von Veränderungen im Gewerbebaubestand.....	62
3 BAUSTOFFKENNWERTE	65
3.1 Spezifische Baustoffkennwerte für Wohngebäude	65
3.1.1 Spezifische Baustoffkennwerte für den Wohngebäudebestand.....	67
3.1.2 Spezifische Baustoffkennwerte für den Wohnungsneubau	69
3.2 Regionale Stofflager im Wohngebäudebestand	71

3.3	Spezifische Baustoffkennwerte für Gewerbegebäude	73
3.3.1	Baustoffstruktur von Gewerbebauten.....	75
3.3.2	Hypothesen zum Verhältnis Konstruktionsvolumen zu Bruttorauminhalt.....	78
3.3.3	Hypothesen zum Baustoff der Gesamtkonstruktion typischer Konstruktionsweisen.....	81
3.3.4	Hypothesen zur mittleren Dichte von Baustoffgruppen	83
3.3.5	Resultierende Baustoffkennwerte nach Gebäudearten	83
4	POTENZIELLE RC-STOFFSTRÖME	85
4.1	Erfassbarkeit.....	86
4.2	Ausschleusung.....	91
4.3	Zulässiger RC-Einsatz	95
4.4	Aktueller Stand des Einsatzes mineralischer Bauabfälle als Betonzuschlagstoff.....	99
4.5	Überführung in das Rechenmodell	106
5	MODELLANNAHMEN ZUR EINSCHÄTZUNG ZUKÜNFTIGER RESSOURCENSCHONUNGSPOTENZIALE	109
5.1	Gebäudebestandsentwicklung.....	109
5.1.1	Zeitliche Betrachtungsperspektive	109
5.1.2	Annahmen zur Entwicklung des Wohnungsbestandes	110
5.1.3	Gewerbegebäudebestandsentwicklung.....	114
5.2	Modellannahmen zur Berechnung der potenziellen RC-Stoffströme und Ressourcenschonungspotenziale	117
6	RESSOURCENSCHONUNGSPOTENZIAL	126
6.1	Regionalisierte Stoffströme recyclingrelevanter Baustoffe	126
6.1.1	Stoffströme recyclingrelevanter Baustoffe im Jahr 2020	126
6.1.2	Langfristige Entwicklung der Stoffströme recyclingrelevanter Baustoffe.....	129
6.2	Angebot und Nutzmenge von Recyclinggesteinskörnungen.....	130
6.2.1	Bereitstellungspotenzial	130
6.2.2	Substitutionspotenzial	131
6.3	Ableitung des Ressourcenschonungspotenzials	133
6.3.1	Erreichbares RESPOT im Jahr 2020 unter Annahme heute üblicher Liefertypen (L*)..	134
6.3.2	Erreichbares RESPOT im Jahr 2020 bei regionsspezifischer Optimierung des Liefertyps	136
6.3.3	Erreichbares RESPOT im Jahr 2020 bei regionsspezifischer Optimierung des Liefertyps und zusätzlicher Optimierung der Erfassungsquote	138
6.3.4	Einfluss veränderter Annahmen zum Baugeschehen auf das erreichbare RESPOT (Sensitivitätsanalyse 2020)	139
6.3.5	RESPOT in mittel- und langfristiger Perspektive	141
7	INTERPRETATION UND EMPFEHLUNGEN	142
7.1	Ergebniszusammenfassung und -interpretation.....	142

7.2	Ansatzpunkte zur Stärkung des hochwertigen Recyclings.....	145
	LITERATUR	149
	GLOSSAR.....	156
ANLAGE 1:	MITTLERE ABRISQUOTEN AUF DER EBENE DER VERWALTUNGSBEZIRKE	159
ANLAGE 2:	OPERATIONALISIERUNG DER INTERDEPENDENZHYPOTHESEN	161
ANLAGE 3:	FORTSCHREIBUNG DER ALTERSSTRUKTUR IM WOHNGEBÄUDEBESTAND BIS ZUM BASISJAHR 2005	162
ANLAGE 4:	REGIONALISIERTES BAUSTOFFLAGER IM WOHNGEBÄUDEBESTAND AUF KREISEBENE.	164
ANLAGE 5:	DIFFERENZIERTER ANNAHMEN ZUR BESCHREIBUNG DER ANTEILE TRAGENDEN UND NICHT TRAGENDER ELEMENTE IN GEWERBEBAUTEN.....	176
ANLAGE 6:	SPEZIFIZIERUNG DER MODELLANNAHMEN ZUR GEBÄUDEBESTANDSENTWICKLUNG.....	178
ANLAGE 7:	ERGÄNZENDE DATEN ZU DEN BERECHNUNGEN AUS KAPITEL 6 .	179
ANLAGE 8:	STOFFKENNWERTE FÜR DEN EINZELBAUSTOFF KUPFER – EIN EXKURS.	184
ANLAGE 9:	ÜBERSCHLAGSRECHNUNG STAHL.....	190

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0-1: Stoffstrommodell „Ressourcenschonungspotenzial“ im Überblick	17
Figure 0-1: An Overview of the Material Flow Model "Resource Conservation Potential" 26	
Abbildung 1-1: Grundstruktur des Stoffstrommodells „Ressourcenschonungspotenzial“	39
Abbildung 1-2: Transformation von Gebäudebestandsveränderungen in Baustoffströme.....	40
Abbildung 1-3: Transformation von Baustoffströmen in Rezyklat-Ströme.....	41
Abbildung 1-4: Bilanzierung von Angebot und Nachfrage an RC-GK zur Berechnung des Ressourcenschonungspotenzials	42
Abbildung 2-1: Verteilung der Kreise in den siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBR auf gebildete Klassen der Bevölkerungsdynamik, bezogen auf den Zeitraum 2005 bis 2020 (eigene Berechnungen auf Grundlage von BBR 2005b).....	44
Abbildung 2-2: Räumliche Verortung der verwendeten Demografie-Raumtypen (verändert nach BBR 2009: 12).....	46
Abbildung 2-3: Struktur des Konsistenzmodells.....	49
Abbildung 2-4: Operationalisierung der Interdependenzhypothese, dargestellt am Beispiel von Raumtyp 1	57
Abbildung 2-5: Entwicklung der Nichtwohngebäude – Baufertigstellungen neuer Gebäude in Deutschland seit 1991 (Quelle: Gruhler, Böhm 2008a auf Grundlage von Statistisches Bundesamt 1991-2007).....	61
Abbildung 2-6: Entwicklung der Nichtwohngebäude – Bauabgänge ganzer Gebäude in Deutschland seit 2000 (Quelle: Gruhler, Böhm 2008a auf Grundlage von Statistisches Bundesamt 1991-2007).....	62
Abbildung 3-1: Spezifisches Gesamtstofflager je Wohnung sowie Betonanteil am Baustofflager der unterschiedenen Bestandsgebäudetypen	68
Abbildung 3-2: Räumliche Verortung des regionalisierten Baustofflagers auf der Ebene der Kreise (angegeben ist die kumulierte Größe des Gesamtbaustofflagers in den jeweiligen Kreisen) (eigene Darstellung)	72
Abbildung 3-3: Übersicht über die methodischen Schritte der Kennzahlenbildung für Gewerbegebäude	74
Abbildung 3-4: Baustoffanteile (Bezug: Gebäude) verschiedener Gebäudearten – Mittelwerte für den Bund (Datenquelle: Fachserie 5/Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes).....	76
Abbildung 3-5: Baustoffanteile (Bezug: Rauminhalt) verschiedener Gebäudearten – Mittelwerte für den Bund (Datenquelle: Fachserie 5/Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes).....	76
Abbildung 3-6: Baustoffanteile (Bezug: Gebäude) verschiedener Gebäudearten – Mittelwerte für den Bund (Datenquelle: Statistische Jahrbücher der Bundesrepublik Deutschland).....	77
Abbildung 3-7: Flächenrelationen – Gebäudearten im Vergleich (BKI-Daten-Analyse von Gruhler und Böhm 2008b).....	79
Abbildung 3-8: Konstruktionsvolumen pro Gebäude – Mittelwerte im Vergleich.....	80

Abbildung 4-1: Kostenveränderung bei Anwendung unterschiedlich geführter Abbruchverfahren an einem Gebäudebeispiel (Quelle: INTECUS 1999)	90
Abbildung 4-2: Einsatz von High-Lift Technik für den Gebäuderückbau	90
Abbildung 4-3: Beispiel für die Korngrößenverteilung (Sieblinienverlauf) bei Betonbrechgut RB 0/45 mm (Quelle: Merkblatt für recyciertes Brechgut aus Betonrestmassen, Ausgabe 2008, Baustoff-Recycling Bayern)	95
Abbildung 4-4: Vorkommensschwerpunkte von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen (Anwendungsbereich Alkali-Richtlinie Teil 2 [blau] und angrenzende Bereiche [grau] mit lokalen Aufkonzentrationen an alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen) (Quelle: Schäfer 2009)	102
Abbildung 4-5 : Verteilung von Anlagenarten zur Aufbereitung von Bauabfällen (Quelle: Europäischen Baustoff-Recycling Verband 2005)	104
Abbildung 5-1: Bandbreite möglicher Haushaltsentwicklungen bis 2050 in Ost- und Westdeutschland (jeweils ohne Berlin) (Berechnungen von Banse, Effenberger (2006) auf der Basis der 10. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung) (Quelle: Banse, Effenberger 2006: 27)	109
Abbildung 5-2: Siebliniendiagramme für Sieblinien nach DIN 1045-2 für Gesteinskörnungen mit 16 bzw. 31,5 mm Größtkorn (Quelle: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. 2004).....	122
Abbildung 5-3: Im laufenden Demonstrationsvorhaben Ludwigshafen entwickelte Rezepturen für verschiedene Versuchsbetone mit Rezyklatanteil (Quelle: Mettke 2009) ..	124
Abbildung 5-4: Aus bisherigen Demonstrationsvorhaben bekannte Rezepturen für Betone mit Rezyklatanteil (Quelle: Weil, M.; Jeske, U.; Schebek, L. 2002)	125
Abbildung 6-1: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau nach Herkunft in 2020.....	126
Abbildung 6-2: Anteile von Wohnen und Gewerbe am Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2020	127
Abbildung 6-3: Anteile von Betonen und Ziegel am Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2020 (W: Westdeutschland, O: Ostdeutschland, D: Deutschland gesamt)	128
Abbildung 6-4: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in den Raumtypen im Jahr 2020	128
Abbildung 6-5: Räumlicher Niederschlag der Bilanz aus Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau (Wohnen und Gewerbe) auf der Ebene der Raumtypen im Jahr 2020	129
Abbildung 6-6: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2050	129
Abbildung 6-7: Baustoffabgang, erfasste Menge und aufbereitete Menge an RC-Gesteinskörnungen in Deutschland 2020	130
Abbildung 6-8: Potenzielles Angebot an RC-GK (aufbereitete Menge an RC-GK) nach Erfassung und Aufbereitung.....	131
Abbildung 6-9: Potenzielle Nutzmengen an Betonen, Gesteinskörnungen und daraus abgeleitete Menge an einsetzbaren RC-GK für unterschiedliche Liefertypen am Beispiel von Deutschland 2020 (in Jahreswerten).....	132

Abbildung 6-10: Potenzielle Nutzmenge an RC-GK und relevantes RC-Angebot unter Annahme von L^* für das Jahr 2020.....	134
Abbildung 6-11: RESPOT unter Annahme von Liefertyp L^* (100 % Betonanteil im RC-Granulat) für das Jahr 2020 vor dem Hintergrund des max. technischen Substitutionspotenzials	135
Abbildung 6-12: RESPOT unter Annahme von Liefertyp L^* (100 % Betonanteil im RC-Granulat) für das Jahr 2020 vor dem Hintergrund des max. technischen Substitutionspotenzials (indizierte Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %)	135
Abbildung 6-13: Regionalisierte RC-GK Mangel und Überschussprofile im Jahr 2020 unter der Annahme von L^*	136
Abbildung 6-14: Potenzielle Nutzmenge an RC-GK und relevantes RC-Angebot bei optimiertem Liefertyp für 2020	137
Abbildung 6-15: RESPOT bei optimiertem Liefertyp (L_2 in RT1, RT2, RT3 und RT6 und L^* in RT4 und RT5) für das Jahr 2020 (indiziert Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %).	137
Abbildung 6-16: RESPOT bei optimiertem Liefertyp (L_2 in RT1, RT2, RT3 und RT6 und L^* in RT4 und RT5) und Erhöhung der Erfassungsquote von 80 % auf 90 % für das Jahr 2020 (indizierte Darstellung – Index max. technisches Substitutionspotenzial = 100 %) ...	138
Abbildung 6-17: Anteil des maximalen Substitutionspotenzials mit dem erreichbaren RESPOT im Jahr 2020 unter Annahmen von L^* (a), L_{opt} (b), jeweils bei 80 % Erfassungsquote sowie L_{opt} bei 90 % Erfassungsquote (c).....	139
Abbildung 6-18: Auswirkungen veränderter Annahmen zum Baugeschehen auf das RESPOT (indizierte Darstellung)	140
Abbildung 6-19: RESPOT vor dem Hintergrund des max. theoretischen Substitutionspotenzials unter Annahme von L_{opt} bei 90 % Erfassungsquote im Jahr 2020 in der Unterscheidung Ost/West	141
Abbildung A-2-1: Interdependenzhypothesen in den sechs Raumtypen	161
Abbildung A-8-1: Input und Output von Kupfer in und aus dem Gebäudebestand (2020), die durch Bestandsveränderungen (Zugang und Abgang von Gebäuden) ausgelöst werden, eigene Hochrechnung unter Verwendung der in Anlehnung an Wittmer (2006) formulierten spezifischen Stoffkennwerte	189

Tabellenverzeichnis

Tabelle 0-1: Annahmen zum Wohnungszugang (Neubau) und Wohnungsabgang (Abriss)..	18
Tabelle 0-2: Annahmen zur Bestandsveränderung von Gewerbegebäuden	18
Tabelle 0-3: Grundannahmen bzgl. Gewinnung und Einsatz von RC-Material	19
Tabelle 0-4: Ressourcenschonungspotenzial und entstehende „Lager“ im Jahr 2020	20
Tabelle 0-5: Ressourcenschonungspotenzial und entstehende „Lager“ im Jahr 2050	22
Table 0-1: Assumptions for the Increase (New Buildings) and the Decrease (Demolition) in the Building Stock.....	26
Table 0-2: Assumptions for the Change in Stock of Commercial Buildings.....	27
Table 0-3: Basic Assumptions Regarding the Recovery and Use of RC Material.....	28
Table 0-4: Resource Conservation Potential and Future "Storage Sites" in 2020.....	29
Table 0-5: Resource Conservation Potential and Future "Storage Sites" in 2050.....	30
Tabelle 2-1: Regionsgruppen mit unterschiedlichen Profilen des demografischen Wandels (verändert nach BBR 2009: 11)	45
Tabelle 2-2: Wohnungsbestand in Wohngebäuden in t_0 (2005) in der verwendeten sachlichen und räumlichen Gliederung (Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2007)	50
Tabelle 2-3: Modellannahmen zur räumlichen Struktur des Zubaus (2005 bis 2020) auf die Raumtypen in Anlehnung an die Verteilung des Neubaupotenzials der ROP auf die Raumtypen (eigene Berechnungen auf Grundlage von BBR 2005b)	51
Tabelle 2-4: Modellannahmen zur räumlichen Struktur des Abgangs auf die Raumtypen in Anlehnung an Angaben zur Abrisstätigkeit zwischen 2002 bis 2005 auf der Ebene von Verwaltungsbezirken (eigene Berechnungen auf Grundlage von Statistisches Bundesamt 2004-2006).....	52
Tabelle 2-5: Modellannahmen zur Veränderung der Haushaltszahlen zwischen 2005 bis 2020, bezogen auf 2005 in Anlehnung an die ROP 2009 (eigene Berechnungen unter Nutzung von Daten aus BBR 2009).....	54
Tabelle 2-6: Schätzparameter zur Ermittlung des Anteils der Haushalte (HH), die Wohnungen in Wohngebäude bewohnen (Leerstandsannahmen basieren auf Statistisches Bundesamt 2008b).....	54
Tabelle 2-7: Aktuelle Ausprägungen des Wohnungsleerstandes in West- und Ostdeutschland nach EZFH und MFH (Quelle: Mikrozensus-Zusatzerhebung - Statistisches Bundesamt 2008b)	55
Tabelle 2-8: Struktur des Wohnungsangebotes, dargestellt am Anteil von Wohnungen in EZFH am Gesamtwohnungsbestand 2005 in Wohngebäuden (eigene Berechnungen auf Grundlage von Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2007).....	56
Tabelle 2-9: Annahmen für Extremausprägungen der Leerstände in den Raumtypen im Falle eines „hohen Angebotsüberhangs“	58
Tabelle 2-10: Leerstandsausprägungen für die Raumtypen, bezogen auf das Jahr 2005 (eigene Schätzung)	59
Tabelle 2-11: Spezifische Entwicklungskennziffern zur Abbildung von Veränderungen im Gewerbebaubestand (eigene Berechnungen)	64

Tabelle 3-1: Grundstruktur der spezifischen Baustoffkennwerte für Bestands-Wohngebäude	67
Tabelle 3-2: Baustoffkennwerte der unterschiedenen Bestands-Wohngebäudetypen in Mg/Wohnung.....	69
Tabelle 3-3: In der verwendeten Datenbank aus BASiS2 implementierte Annahmen zum erhöhten Holzanteil in Zubautypen	70
Tabelle 3-4: Baustoffkennwerte der unterschiedenen Neubau-Wohngebäudetypen in Mg/Wohnung.....	71
Tabelle 3-5: Zusammengefasstes Ergebnis der Hochrechnungen zum regionalisierten Baustofflager im Wohngebäudebestand nach Hauptbaustoffgruppen.....	72
Tabelle 3-6: Baustoffanteile (Bezug: Gebäude) verschiedener Gebäudearten – Mittelwerte für den Bund (Datenquelle: Statistische Jahrbücher der Bundesrepublik Deutschland).78	
Tabelle 3-7: Konstruktions-Grundflächen-Anteil unterschiedlicher Gebäudearten	79
Tabelle 3-8: Konstruktionsvolumen pro Gebäude – Mittelwerte im Vergleich	80
Tabelle 3-9 Anteil der tragenden Konstruktionen an der Gesamtkonstruktion für typische Konstruktionsweisen – Schätzungen und Annahmen.....	82
Tabelle 3-10: Geschätzte Dichten unterschiedlicher Hauptbaustoffe bzw. Baustoffgruppen.83	
Tabelle 3-11: Gebäudebezogene spezifische Baustoffkennwerte für Gewerbegebäude	83
Tabelle 3-12: spezifische Baustoffkennwerte für Gewerbegebäude	84
Tabelle 4-1: Im Normenwerk (DIN EN 12620 und DIN 1045-2) festgelegte Anforderungen an Gesteinskörnungen.....	91
Tabelle 4-2: Stoffliche Zusammensetzung der Liefertypen rezyklierter Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100:2002-02.....	97
Tabelle 4-3: Gemäß Richtlinie des DAfStB zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%) im Beton	98
Tabelle 4-4: Recherchierte Mengen an hergestelltem Betonzuschlag aus RC-Material in Tausend Mg (zusammengefasst aus Angaben d. statistischen Landesämter).....	103
Tabelle 4-5: Anzahl der Betreiber von Aufbereitungsanlagen (Bundesstatistik zu betonzuschlagherstellenden Anlagen (Statistisches Bundesamt, 2000-2006)	104
Tabelle 5-1: Überblick über die angenommenen Werte für den Zugang und Abgang an Wohnungen im Wohngebäudebestand in 2020 und 2050 (eigene Berechnungen in Anlehnung an Banse und Effenberger 2006:28ff.).....	111
Tabelle 5-2: Projektion des Wohnungszugangs und Wohnungsabgangs auf die Raumtypen für 2020	112
Tabelle 5-3: Resultierender Wohnungsleerstand der Basisvariante im Jahr 2020 in den Raumtypen	112
Tabelle 5-4: Annahmen zum Wohnungszubau im Jahr 2020 in V1 in der Gegenüberstellung zur Basisvariante (Annahmen sind in Anlehnung an das in der Raumordnungsprognose 2005 angegebene Neubaupotenzial getroffen).....	113
Tabelle 5-5: Annahmen zum Wohnungsabgang im Jahr 2020 in V2 in der Gegenüberstellung zur Basisvariante (Annahmen sind in Anlehnung an die Quoten angenommen, die sich aus erfassten Wohnungsabgängen der jüngsten Entwicklung ermitteln lassen).....	114

Tabelle 5-6: Resultierender Wohnungsleerstand der Basisvariante im Jahr 2020 in den Raumtypen	114
Tabelle 5-7: Annahmen zum Zugang an Gewerbebauten im Jahr 2020 (Gebäude/Jahr) (eigene Schätzung auf Grundlage der Anzahl Erwerbspersonen aus BBR (2009) und hypothetisch formulierter spezifischer Entwicklungskenngrößen)	115
Tabelle 5-8: Annahmen zum Abgang an Gewerbebauten im Jahr 2020 (Gebäude/Jahr) (eigene Schätzung auf Grundlage der Anzahl Erwerbspersonen aus BBR (2009) und hypothetisch formulierter spezifischer Entwicklungskenngrößen)	116
Tabelle 5-9: Annahmen zum Zugang an Gewerbebauten im Jahr 2050 (Gebäude/Jahr) (eigene Schätzung auf Grundlage der Bevölkerungszahl in 2050 aus BBR (2009) und hypothetisch formulierter spezifischer Entwicklungskenngrößen)	116
Tabelle 5-10: Annahmen zum Zugang an Gewerbebauten im Jahr 2050 (Gebäude/Jahr) (eigene Schätzung auf Grundlage der Bevölkerungszahl in 2050 aus BBR (2009) und hypothetisch formulierter spezifischer Entwicklungskenngrößen)	116
Tabelle 5-11: Vergleich der Schätzungen zum Zugang an Gewerbebauten in den Jahren 2020 und 2050 (prozentuale Veränderungen 2050 gegenüber 2020, gebäudebezogen) ..	117
Tabelle 5-12: Vergleich der Schätzungen zum Abgang an Gewerbebauten in den Jahren 2020 und 2050 (prozentuale Veränderungen 2050 gegenüber 2020, gebäudebezogen ...	117
Tabelle 5-13: Beispiele für Betonanwendungen des Hochbaus unter Einsatz von rezyklierten Zuschlägen (Quelle: Weil, M. 2004, Buchgeister, J. 2005)	120
Tabelle 5-14: Im Berechnungsmodell verwendete materialspezifischen Festgrößen	121
Tabelle 5-15: Für das Berechnungsmodell verwendete Annahmen zur Erfassbarkeit, Ausschleusung sowie den zulässigen Beimischungsanteilen an RC-GK	123
Tabelle 5-16: Für das Berechnungsmodell verwendete Annahmen zu den Anteilen an RC-Baustoffen im Zubaubeton	123
Tabelle 6-1: Potenzielles Angebot an Recyclinggesteinskörnungen im Jahr 2020 nach Raumtypen	131
Tabelle A-1-1: Aus der Bautätigkeitsstatistik abgeleitete mittlere Abrissquoten, bezogen auf den Erhebungszeitraum 2002 bis 2005 (eigene Berechnung auf Grundlage von Statistisches Bundesamt, Fachserie 5, Reihe 3)	159
Tabelle A-3-1: Modellannahmen zum jährlichen Abriss auf den Bestand des Vorjahres.....	162
Tabelle A-3-2: Berlin, Bestandsaltersklassen.....	163
Tabelle A-4-1: Regionalisierte Baustofflager auf Kreisebene, differenziert nach den Baustoffhauptgruppen.....	164
Tabelle A-5-1: Typische Konstruktionsweisen und ihre Differenzierung der tragenden und nicht tragenden Elemente	176
Tabelle A-6-1: Projektion des Wohnungszugangs und Wohnungsabgangs für 2020 nach EZFH und MFH auf die Raumtypen	178
Tabelle A-6-2: Modifizierte Annahmen zur Bautätigkeit im Jahr 2020 in den Bestandsentwicklungsvarianten V1 und V2 nach EZFH und MFH und nach Raumtypen in der Gegenüberstellung zur Basisvariante	178

Tabelle A-7-1: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau nach Herkunft in 2020 (siehe Abbildung 6-1).....	179
Tabelle A-7-2: Anteile von Wohnen und Gewerbe am Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2020 (siehe Abbildung 6-2)	179
Tabelle A-7-3: Anteile von Betonen und Ziegel am Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2020 (siehe Abbildung 6-3)	179
Tabelle A-7-4: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in den Raumtypen (siehe Abbildung 6-4).....	179
Tabelle A-7-5: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau nach Herkunft in 2050 (siehe Abbildung 6-6).....	180
Tabelle A-7-6: Baustoffabgang, erfasste Menge und aufbereitete Menge an RC-Gesteinskörnungen in Deutschland 2020 (siehe Abbildung 6-7)	180
Tabelle A-7-7: Potenzielles Angebot an RC-GK (aufbereitete Menge an RC-GK) nach Erfassung und Aufbereitung (siehe Abbildung 6-8)	180
Tabelle A-7-8: Potenzielle Nutzmengen an Betonen, Gesteinskörnungen und daraus abgeleitete Menge an einsetzbaren RC-GK für unterschiedliche Liefertypen am Beispiel von Deutschland 2020 (angegebene Werte sind Jahreswerte) (siehe Abbildung 6-9) .	180
Tabelle A-7-9: Potenzielle Nutzmenge an RC-GK 2020 in Abhängigkeit des Liefertyps nach Raumtypen	181
Tabelle A 7-10: Potenzielle Nutzmenge an RC-GK in 2050 in Abhängigkeit des Liefertyps.....	181
Tabelle A-7-11: Potenzieller Nutzmenge an RC-GK und relevantes RC-Angebot unter Annahme von L* für 2020 (siehe Abbildung 6-10)	181
Tabelle A-7-12: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials unter Annahme von L* für 2020 (siehe Abbildung 6-11)	182
Tabelle A-7-13: RESPOT unter Annahme von L* im Jahr 2020 nach Raumtypen, vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials (indiziert Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %) (siehe Abbildung 6-12).....	182
Tabelle A-7-14: Regionalisierte RC-GK Mangel und Überschussprofile unter der Annahme von L* für 2020 (siehe Abbildung 6-13).....	182
Tabelle A-7-15: Potenzieller Nutzmenge an RC-GK und relevantes RC-Angebot bei optimiertem Liefertyp für 2020 (siehe Abbildung 6-14)	182
Tabelle A-7-16: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials bei optimiertem Liefertyp für 2020 (indiziert Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %) (siehe Abbildung 6-15)	183
Tabelle A-7-17: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials bei optimiertem Liefertyp und Erhöhung der Erfassungsquote von 80 % auf 90 % für 2020 (indiziert Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %) (siehe Abbildung 6-16)	183
Tabelle A-7-18: Auswirkungen der veränderter Annahmen zum Baugeschehen auf das RESPOT (indizierte Darstellung) (siehe Abbildung 6-18)	183

Tabelle A-7-19: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials bei optimiertem Liefertyp (L*) und Erhöhung der Erfassungsquote von 80 % auf 90 % für 2020 in der Unterscheidung Ost/West (siehe Abbildung 6-19)	183
Tabelle A-7-20: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials unter Annahme von Liefertyp L* in 2050 in der Unterscheidung Ost/West (siehe Abbildung 6-19)	183
Tabelle A-8-1: Spezifische Kupfergehalte in Anwendungen des Bauwesens (Quelle Schäfer 2004: 38 unter Verwendung von Angaben aus Satlow et al. 2002)	184
Tabelle A-8-2: Regionales Kupferlager einer Schweizer Beispielregion (Quelle: Wittmer 2006: 76f.)	186
Tabelle A-8-3: Spezifische Stoffkennwerte für Kupfer nach Gebäudetyp (entnommen aus Schäfer 2004: 38/Satlow et al. 2002 bzw. berechnet unter Verwendung von Daten aus Wittmer 2006: 76f.).....	186
Tabelle A-8-4: Mittlere Wohnungsgröße im Wohnungsbestand nach EZFH und MFH (eigene Berechnung auf Grundlage von 2007, Bezugsjahr 2005)	187
Tabelle A-8-5: Mittlere Bruttogeschossfläche je Gebäude nach Gebäudeart (eigene Berechnung auf Grundlage von Angaben zur Nutzflächen der Bautätigkeitstatistik und Ergebnisse aus BKI-Flächenanalysen von Gruhler und Böhm 2008	187
Tabelle A-8-6: Angenommene Zuordnung der Gewerbegebäudetypen aus Wittmer (2006) zu den verwendeten Gebäudearten des Stoffstrommodells	188
Tabelle A-8-7: Deutschland: Kupferlager 2005, Kupferströme 2020 (eigene Hochrechnung)	188
Tabelle A-9-1: Stofflager Stahl (Rohbau), Masse in Mio. t , Bezugsjahr 2005	190
Tabelle A-9-2: Stoffflüsse Stahl (aus Neubau und Abriss ganzer Wohngebäude), Masse in Tausend Tonnen/Jahr (gerundet)	191

Abkürzungsverzeichnis

A	Österreich
AbfRRL	Europäische Abfallrahmenrichtlinie
ABL	Alte Bundesländer
ARGE KWTB	Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau
B	Belgien
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BKI	Baukosteninformationszentrum
BRI	Brutto-Rauminhalt
CE	Conformité Européenne (franz.), Kennzeichnung, die Konformität mit EU-Richtlinien signalisieren soll
CH	Schweiz
CZ	Tschechische Republik
D	Deutschland
DAfStB	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLG	Dienstleistungsgebäude
E	Spanien
EP	Erwerbsperson
EW	Einwohner
EZFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
FS	Fachserie
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
GK	Gesteinskörnung
HH	Haushalt
I	Italien
KMF	künstliche Mineralfasern
KrWG	Gesetz zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts (in Entwurfsfassung)
KrW-/AbfG	Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz)
MFH	Mehrfamilienhäuser
Mg	Megagramm (Gewichtseinheit, 1 Mg = 1 t)
NBL	Neue Bundesländer

NL	Niederlande
NWG	Nichtwohngebäude
P2	Wohnungsbautyp eines Plattenbaus
PRG	Produktionsgebäude
QP 71	Wohnungsbautyp eines Plattenbaus
RAL	Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung, (ehemals Reichsausschuss für Lieferbedingungen)
RC	Recycling
RC-GK	rezyklierte Gesteinskörnung
RESPOT	Ressourcenschonungspotenzial
ROP	Raumordnungsprognose
RT	Raumtyp
RT 1	Raumtyp: Vorwiegend Kernstädte der alten Länder
RT 2	Raumtyp: Ländliche Kreise mit geringer Dynamik in den alten Ländern
RT 3	Raumtyp: Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik in den alten Ländern
RT 4	Raumtyp: Vorwiegend Kernstädte der neuen Länder
RT 5	Raumtyp: Dünn besiedelte, ländliche und häufig periphere Räume in den neuen Ländern
RT 6	Raumtyp: Umlandkreise von Berlin und Kernstädten der neuen Länder mit Suburbanisierungstendenzen
StaBu	Statistisches Bundesamt Deutschland
StaLa	Statistisches Landesamt
WBS 70	Wohnungsbauweise 70 (Wohnhaus in Plattenbauweise)
WE	Wohneinheit

Kurzfassung

Die Nutzung von Abfallstoffen leistet einen wichtigen Beitrag zur Schonung natürlicher Ressourcen. Dies gilt insbesondere bei einem hochwertigen Recycling, welches eine stoffliche Nutzung der Abfälle und die Herbeiführung möglichst enger Produktkreisläufe vorsieht und demzufolge in der europäischen Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG, Art. 11) und dem hierauf aufbauendem aktuellen Arbeitsentwurf zum Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, § 8) zur vorrangigen Zielstellung für die Abfallverwertung erhoben wird. Der Baubereich ist allein hinsichtlich der zu bewirtschaftenden Mengenströme für die Rückführung von Materialien in die Wertstoffkreisläufe bedeutend¹.

Für die zukünftigen Mengenströme im Baubereich ist die Entwicklung des Gebäudebestandes maßgebend. Diese Entwicklung wird wesentlich von demografischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestimmt. Derzeit unterliegen diese Rahmenbedingungen großen Veränderungen. So ist in Deutschland für die kommenden Jahre mit enormen räumlichen und zeitlichen Disparitäten hinsichtlich der Bestandsentwicklung zu rechnen. Da die Kreisläufe des Baustoffrecyclings räumlich begrenzt sind, ergeben sich regional sehr unterschiedliche Stoffstrombilanzen sowie Mengenpotenziale für die hochwertige Nutzung von Bauabfällen im Hochbau.

Zielstellung

Mit der vorliegenden Studie wird das Ziel verfolgt, mittel- und langfristig² zu erwartende Potenziale eines hochwertigen Recyclings mineralischer Bauabfallstoffe auszuloten. Speziell auf den Massenbaustoff Beton bezogen wird die Frage beantwortet, in welchem Umfang ein Recycling „aus dem Hochbau in den Hochbau“ erfolgen könnte und welches Ressourcenschonungspotenzial³ damit zu erschließen wäre. Hauptgegenstand der Betrachtungen sind die bei der Gebäudeherstellung im Beton eingesetzten Gesteinskörnungen. Hierzu erfolgt eine Massestrombilanzierung die darauf fokussiert, die zukünftig bereitstellbaren Mengen geeigneter Bauabfallrezyklate dem Bedarf an Betonzuschlagsstoffen und der durch Rezyklat substituierbaren Menge an entsprechenden Zuschlagsstoffen gegenüber zu stellen.

¹ Im Jahre 2004 fielen in Deutschland insgesamt 200,7 Mio. t mineralische Bauabfälle zur Entsorgung an, davon 50,5 Mio. t Bauschutt (s. KWTB 2007). Die Bauabfallbilanzen zeigen aber, dass erhebliche Mengen an mineralischen Bauschuttmaterialien bislang nicht wieder im konstruktiven Bereich, also dort, wo sie zu Abfall geworden sind, eingesetzt werden. Ihre Verwertung erfolgt hauptsächlich als Schüttgut, lose Bettung, beim Deponiebau und als Verfüllmaterial.

² Der mittelfristige Zeithorizont reicht bis zum Jahr 2020, die langfristige Perspektive bis zum Jahr 2050.

³ Das Ressourcenschonungspotenzial (RESPOT) im Sinne dieser Studie umfasst einen rein rohstofflichen Ansatz. Der Begriff wird hier mit dem Abbauvolumen an Naturkiesmaterial operationalisiert, welches vermeidbar ist, indem bei der Erzeugung von Beton mineralisches Rezyklat als Substitutionsbaustoff zum Einsatz gebracht wird. Darüber hinausgehende Effekte auf die Ressourcennutzung (z. B. Effekte auf Flächennutzung, Biodiversität und andere Umweltmedien) werden im Rahmen dieser Studie nicht explizit thematisiert.

Entwicklung eines Stoffstrommodells

Die Quantifizierung der recyclingrelevanten Stoffströme wird über regionalisierte Modellrechnungen vorgenommen, unter Anwendung eines hierzu entwickelten Stoffstrommodells. Für die mittelfristige Betrachtung erfolgt die Regionalisierung auf der Ebene von zu Raumtypen zusammengefassten Landkreisen⁴, die Langfristperspektive lässt eine regionalisierte Aussage im Moment lediglich in der Differenzierung nach Ost- und Westdeutschland⁵ zu.

Das Stoffstrommodell setzt sich aus mehreren, aufeinander aufbauenden Modellkomponenten zusammen, innerhalb derer recyclingrelevante Stoffstromgrößen berechnet und im Weiteren als Ausgangswerte in nachfolgende Modellkomponenten übergeben werden (Abbildung 0-1).

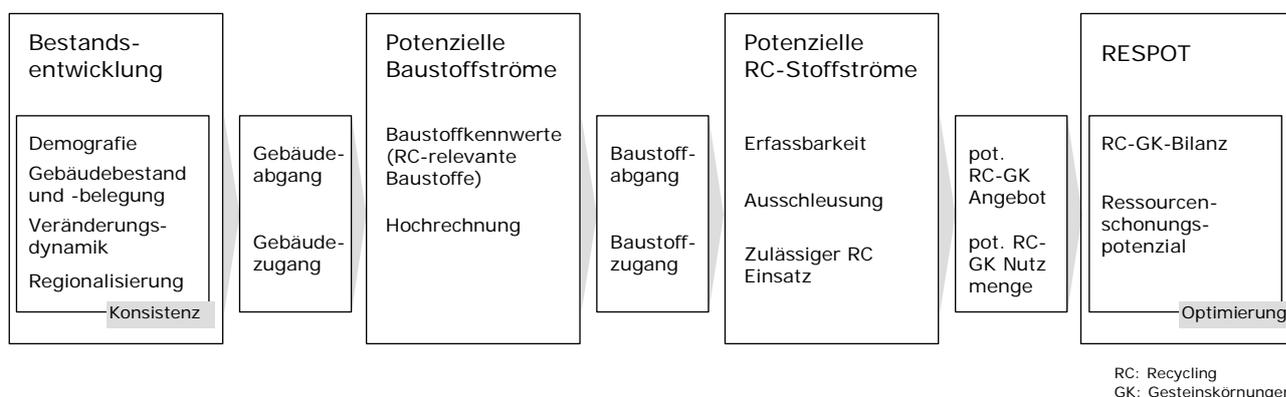


Abbildung 0-1: Stoffstrommodell „Ressourcenschonungspotenzial“ im Überblick

Die Modellkomponente „Bestandsentwicklung“ dient der Abbildung möglicher zukünftiger Gebäudeabgänge und -zugänge in und aus dem Wohn- und Gewerbegebäudebestand in ihren regionalen Ausprägungen. Die Abschätzung regionaler Veränderungen im Wohnungsbestand greift auf aggregierte Vorausberechnungen von Banse und Effenberger (2006) zurück. Diese werden unter Beachtung relevanter Parameter zur Beschreibung des Wohnungsangebotes, der Wohnungsnachfrage sowie hieraus resultierender Bilder der Bestandsnutzung auf die verwendete Raumtypologie projiziert. Das für den Bereich Gewerbe angewandte Verfahren basiert dagegen auf hypothetisch formulierten Kennwerten von Gebäudezu- und -abgängen⁶. Demnach wächst der Wohnungsbestand mittelfristig in Westdeutschland und in den von Suburbanisierungstendenzen gekennzeichneten Landkreisen Ostdeutschlands weiter an, überwiegend finden sich in Ostdeutschland aber Raumtypen, in denen die Wohnungsabrisszahlen den Neubau übersteigen. Langfristig übersteigt der Abriss im Wohnungsbestand den Neubau nahezu flächendeckend (Tabelle 0-1).

⁴ Für die Regionalisierung wird die Raumtypisierung der aktuellen Raumordnungsprognose des BBR (BBR 2009) genutzt, die unterschiedliche Entwicklungsdynamiken, die auf Kreisebene zur Ausprägung kommen, reflektiert. Diese unterscheidet jeweils 3 Raumtypen in Westdeutschland und in Ostdeutschland.

⁵ Die räumliche Abgrenzung Ost- und Westdeutschlands lehnt sich an der Unterscheidung des territorialen Gebietes der sogenannten Neuen und Alten Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland an.

⁶ Bezogen auf Einwohner bzw. Erwerbspersonen.

Tabelle 0-1: Annahmen zum Wohnungszugang (Neubau) und Wohnungsabgang (Abriss)

Wohnungsbestandsveränderungen im Jahr 2020 (1000 Wohnungen/a)*									
	Deutschland	Westdeutschland				Ostdeutschland			
		Gesamt	RT1	RT2	RT3	Gesamt	RT4	RT5	RT6
Zubau	204	187	51	25	111	17	3	9	5
Abriss	113	63	23	10	31	50	11	35	4
Zubau/Abriss	1,8	3,0	2,2	2,5	3,6	0,3	0,3	0,3	1,3

RT1: Kernstädte; RT2: Landkreise mit geringer Dynamik, RT3: Landkreise mit größerer Dynamik, RT 4: Kernstädte, RT 5: dünn besiedelt und häufig peripher, RT6: Umlandkreise mit Suburbanisierungstendenzen

Wohnungsbestandsveränderungen im Jahr 2050 (1000 Wohnungen/a)			
	Deutschland	Westdeutschland	Ostdeutschland
Neubau	107	94	13
Abriss	282	232	50
Zubau/Abriss	0,4	0,4	0,3

Für den Gewerbebaubestand wird angenommen, dass dieser sowohl in Westdeutschland wie auch in Ostdeutschland ansteigt (Tabelle 0-2).

Tabelle 0-2: Annahmen zur Bestandsveränderung⁷ von Gewerbegebäuden

Gewerbegebäudebestandsveränderungen im Jahr 2020 (1000 Gebäude./a)									
	Deutschland	Westdeutschland				Ostdeutschland			
		Gesamt	RT1	RT2	RT3	Gesamt	RT4	RT5	RT6
Neubau	36,0	31,0	8,8	5,7	16,5	5,0	0,8	3,4	0,7
Abriss	16,2	13,9	4,0	2,6	7,4	2,2	0,4	1,5	0,3
Zubau/Abriss	2,2								

RT1: Kernstädte; RT2: Landkreise mit geringer Dynamik, RT3: Landkreise mit größerer Dynamik, RT 4: Kernstädte, RT 5: dünn besiedelt und häufig peripher, RT6: Umlandkreise mit Suburbanisierungstendenzen

Gewerbegebäudebestandsveränderungen im Jahr 2050 (1000 Geb./a)			
	Deutschland	Westdeutschland	Ostdeutschland
Neubau	26,0	23,0	3,1
Abriss	11,9	10,5	1,4
Zubau/Abriss	2,2		

Gegenstand der Modellkomponente „Potenzielle Baustoffströme“ ist es, die zuvor für die Raumtypen geschätzten Gebäudezu- und -abgänge in Baustoffmassenströme umzurechnen. Im Fokus stehen dabei recyclingrelevante Baustoffe⁸. Hierfür kommt eine Berechnungsmethode zur Anwendung, die auf gebäudetypologischen Baustoffkennwerten beruht. Für Wohngebäude können gebäudetypologische Baustoffkennwerte in Anlehnung an vorliegen-

⁷ Identische Verhältnisse von Zu- und Abgang sind der gewählten Modellierungsmethode geschuldet.

⁸ „Recyclingrelevante Baustoffe“ im Sinne der Ausrichtung dieser Studie sind Betone und Ziegel des Baustoffabgangs, da hieraus RC-Gesteinskörnungen hergestellt werden können, die als Zuschlag in Betone zulässig sind, sowie Betone im Baustoffzugang, da diese RC-Material aufnehmen können.

de Studien formuliert werden. Für Gewerbegebäude erfolgt die Kennzahlenbildung hypothetisch im Rückgriff auf vorliegende Analysen von Daten zur Bautätigkeit

Aus den Mengen recyclingrelevanter Baustoffe berechnet die Modellkomponente „Potenzielle RC-Stoffströme“ die Angebotsmenge an Recycling-Gesteinskörnungen, die aus den abgehenden Bauabfallstoffströmen durch Aufbereitung gewonnen werden kann sowie die Nutzmengen an Recycling-Gesteinskörnungen, die in den im Hochbau nachgefragten Beton unter derzeitigen Norm- und Regelvoraussetzungen eingebracht werden könnten. Der Berechnung der Angebotsmenge liegen Annahmen zum erfassbaren Anteil an den recyclingrelevanten Fraktionen der Betone und Ziegel aus dem abgehenden Bauabfall sowie Annahmen zur Ausschleusungsquote ungeeigneter Bestandteile⁹ bei der Aufbereitung zugrunde. Dabei bilden die technischen Obergrenzen primäre Orientierungspunkte. Bei derzeit verfügbarer Technik (Annahmen s. Tabelle 0-3) können aus der abgehenden Menge recyclingrelevanter Baustoffe etwa 48 % als RC-Gesteinskörnungen für Hochbauanwendungen bereitgestellt werden. In den Beton des gewöhnlichen Hochbaus können nach geltenden technischen Regelwerken in Abhängigkeit vom Gehalt an Ziegelanteilen maximal 25 % bzw. 32 % des Gesamtvolumens in Form von RC-Gesteinskörnungen eingebracht werden.

Tabelle 0-3: Grundannahmen bzgl. Gewinnung und Einsatz von RC-Material

Gewinnung von RC-Material aus dem abgehenden Baumassenstrom	20 % Erfassungsverlust 40 % Ausschleusung im Zuge der Aufbereitung	
Einsatz von RC-GK im Zubaubeton	bezogen auf das Volumen an GK im Beton	bezogen auf das Beton-Gesamtvolumen
	45 Vol.-% bei Liefertyp L* und L1 35 Vol.-% bei Liefertyp L2	32 Vol.-% bei Liefertyp L* und L1 25 Vol.-% bei Liefertyp L2

Anteilsverhältnisse (RC-Betonspalt : RC-Ziegelsplitt) in den Liefertypen: L*: 100:0, L1: 90:10, L2: 70:30; Der Volumenanteil an Gesteinskörnung im Beton wird mit 72 % angesetzt.

Die Modellkomponente „RESPOT“ bilanziert das berechnete Angebot sowie die nutzbare Menge an rezyklierten Gesteinskörnungen und ermittelt so die unter gegebenen Konstellationen der Gebäudebestandsentwicklung im Hochbau tatsächlich verwertbare Menge an RC-Gesteinskörnungen. Das Ressourcenschonungspotenzial entspricht dem Volumen an Naturkiesmaterial, auf dessen Einsatz bei der Betonerzeugung für den Hochbau aufgrund dieser Substitution verzichtet werden kann. Als Messlatte zur Einordnung und Bewertung des berechneten RESPOT wird diesem ein Referenzwert gegenübergestellt. Dieser stellt das maximale technische Substitutionspotenzial dar, welches unter der Annahme unbegrenzt verfügbarer Mengen an Recyclinggesteinskörnungen erreicht werden könnte. Unterschreitet das RESPOT diesen Referenzwert, erlaubt das Modell die Simulation von Optimierungsszenarien und damit die Ableitung von Ansatzpunkten zur verbesserten Ausschöpfung möglicher Ressourcenschonungspotenziale (z. B. Umorientierung beim einzusetzenden Liefertyp, abhängig von der in den Raumtypen vorherrschenden Angebots-Nachfragekonstellation, alternative Setzungen bei den Annahmen zur Gewinnung und zum Einsatz von RC-Material).

Die Modellrechnungen zeigen, dass unter den dargelegten Annahmen der Gebäudebestandsentwicklung mittelfristig in Westdeutschland die potenzielle Nachfrage nach RC-GK

⁹ insbesondere Feinkornanteile

mit dem verfügbaren Angebot nicht gedeckt werden kann. In den entsprechenden Regionen übersteigt die Neubaudynamik die Abrissintensität zum Teil erheblich. Bezogen auf hochwertiges Recycling besteht demnach ein Mangel an geeignetem RC-Material aus dem Hochbau. Dagegen kann für weite Teile Ostdeutschlands, wo die Regionen überwiegend eine vergleichsweise niedrige Neubautätigkeit und hohe Abrisstätigkeit aufweisen, ein Überschuss an RC-GK aufgezeigt werden, sofern die Betrachtung streng auf hochwertiges Recycling von Hochbau zu Hochbau begrenzt bleibt. Eine Ausnahme bilden hier die „Umlandkreise mit Suburbanisierungstendenzen“, in denen in abgeschwächter Form ähnliche Verhältnisse der Bestandsveränderung vorherrschen, wie sie in Westdeutschland zu beobachten sind. Wird das regionale Potenzial, das sich bei Anwendung der technischen und normbedingten Grenzen sowie den zu erwartenden regionalen Stoffflüssen ergibt, für hochwertiges Recycling genutzt, kann im Jahr 2020 ein Volumen von 4,1 Mio m³/a an natürlichen Gesteinskörnungen durch RC-GK substituiert werden. Weitere 1,8 Mio m³ für Zwecke des hochwertigen Recycling gewinnbarer RC-GK können nicht im Hochbau untergebracht werden. Dieses „Lager“ entsteht größtenteils in Ostdeutschland (Tabelle 0-4).

Tabelle 0-4: Ressourcenschonungspotenzial und entstehende „Lager“ im Jahr 2020

Bezugsjahr: 2020	Deutschland	Westdeutschland	Ostdeutschland
Substituierbare Menge natürlicher GK im Beton auf Basis des Bedarfes für den Neubau, (RESPOT) [Mio m ³ /a]	4,1	3,6	0,6
Menge an bereitstellbaren RC-GK, die mangels Bedarfs nicht in den Hochbau eingebracht werden kann („Lager“) [Mio m ³ /a]	1,8	0,5	1,3

Bei einer ausschließlichen Fokussierung auf den Einsatz der aus mineralischem Hochbauabfall gewinnbaren RC-Gesteinskörnungen als Betonzuschlag im Hochbau bilden sich mittelfristig in Deutschland inkongruente Tendenzen aus: In einigen Regionen würde es Überschussmengen an hochwertig einsetzbarem RC-Material geben während in anderen Regionen gleichzeitig ein Mangel bestünde.

Diese regionalen Disparitäten können aufgrund der nur in engen räumlichen Grenzen wirtschaftlich realisierbaren Baustoffrecyclingkreisläufe nicht aufgelöst werden, sondern verlangen nach einer regionalisierten Herangehensweise, wie sie dieser Studie zugrunde liegt. Nur so ist es sinnvoll möglich, Potenziale zur Kreislaufführung im Hochbau adäquat zu erfassen und auszuschöpfen

So kann Betonzuschlag aus RC-Gesteinskörnungen mit unterschiedlichen Anteilen an Beton- und Ziegelbestandteilen zum Einsatz gelangen. Die zulässigen Anteile der verschiedenen Stoffgruppen regelt in Deutschland derzeit die DIN 4226-100 mit der Festlegung von Anforderungen für Gesteinskörnungs-Liefertypen. In Abhängigkeit vom eingesetzten Liefer-typ sind bestimmte Beimischungsmengen an RC-Zuschlag in den Beton bautechnisch zulässig. Mit erhöhtem Ziegelanteil im RC-Zuschlag verringert sich der maximal zulässige Beimischungsanteil im Beton. Ohne spezielle Sonderzulassung ist derzeit die höchste Substitution durch Einsatz eines RC-Zuschlags zu erreichen, welcher zu mindestens 90 Gew.-% aus RC-Betongranulat besteht. Dies macht jedoch eine ausreichende lokale Verfügbarkeit an geeig-

netem Betonmaterial aus Abbruchtätigkeit zur Voraussetzung. Reicht das verfügbare RC-Betonmaterial hingegen nicht aus, um beim nachgefragten Beton die technisch maximal zulässige Substitution natürlicher Gesteinskörnungen vorzunehmen, kann es hinsichtlich der Maximierung der Ressourcenschonung von Vorteil sein, RC-Gesteinskörnungen mit erhöhtem Ziegelanteil zum Einsatz zu bringen, obgleich sich die zulässige Beimischungsmenge pro Einheit Beton dadurch verringert. Diese Potenzialreserve kann in den Raumtypen nachgewiesen werden, die mittelfristig durch einen deutlichen Mangel an RC-GK gekennzeichnet sind.

Die für den Einsatz im Beton zulässigen Zusammensetzungen der RC-Gesteinskörnungen haben mittelfristig wesentlichen Einfluss auf das durch hochwertiges Recycling erreichbare Ressourcenschonungspotenzial. Ob durch Einsatz von unterschiedlich zusammengesetzten Gesteinskörnungen eine bessere Ausschöpfung des Ressourcenschonungspotenzials bewirkt werden kann ist allerdings vom Verhältnis zwischen verfügbarer Menge an RC-Gesteinskörnungen und der aus der Nachfrage nach Beton resultierenden Menge einbringbaren RC-Zuschlags abhängig. Dieses Verhältnis differiert mittelfristig regional stark.

Neben der Einflussnahme auf Input-Seite, beispielsweise durch gezielt höhere Nutzung von nicht betonstämmigen Mineralstoffen im RC-Zuschlag und Möglichkeiten zur Erhöhung der Beimischungsanteile, sind Optimierungen im Bereich der Erfassung und Aufbereitung abgehender Bauabfälle aus dem Gebäudebestand naheliegende Ansatzpunkte, um das Ressourcenschonungspotenzial durch hochwertiges Recycling weiter zu steigern.

Die Modellannahmen zur sortenreinen Erfassung von Beton- und Ziegelfractionen und zur Erzeugbarkeit von geeigneten RC-GK durch Ausschleusung ungeeigneter Stoffanteile (siehe Tabelle 0-4) kommen im Querschnitt der heutigen Gegebenheiten allerdings ambitionierten technischen Machbarkeitsgrenzen gleich. Hier eine weitere Optimierung zu erreichen würde gegenwärtig mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand in Verbindung stehen und ggf. auch das Risiko eines Qualitätsabfalls im erzeugten Rezyklat vergrößern. Als Ansatzpunkte um das erreichbare Ressourcenschonungspotenzial weiter zu steigern, sind diese daher vorerst von nachrangiger Bedeutung.

In der Langfristbetrachtung verschieben sich die Verhältnisse zwischen dem Materialoutput aus dem Gebäudebestand und dem Materialinput in den Gebäudebestand. Aus der sich abzeichnenden demografischen Dynamik lässt sich ableiten, dass im Jahr 2050 insbesondere im Wohnungsbau der Abriss den Neubau nahezu flächendeckend deutlich übersteigen wird. Möglicherweise wächst das Gewerbegebäudelager langfristig weiter an; verglichen mit der mittelfristigen Perspektive allerdings mit einer deutlich geringeren Dynamik. Dadurch verringert sich langfristig das im Hochbaubereich durch hochwertiges Recycling maximal zu erzielende Ressourcenschonungspotenzial. Sowohl in Ostdeutschland wie auch in Westdeutschland kann mit dem potenziell verfügbaren RC-Material die technisch gesetzte Obergrenze der Substitution von Betonzuschlag erreicht werden. Die Modellrechnungen weisen das erreichbare Ressourcenschonungspotenzial für das Jahr 2050 mit 3,3 Mio. m³ aus. Dies entspricht einem Rückgang um ca. 20 % gegenüber dem entsprechenden Wert aus dem Jahr 2020. Gleichzeitig würde sich – bezogen auf hochwertiges Recycling – langfristig flächendeckend ein Überangebot an RC-Material abbilden lassen. Dieses wird für das Jahr

2050 auf 6,2 Mio. m³/Jahr geschätzt, was gegenüber dem für das Jahr 2020 ausgewiesenen Wert eine Steigerung um Faktor 3,4 bedeutet.

Tabelle 0-5: Ressourcenschonungspotenzial und entstehende „Lager“ im Jahr 2050

Bezugsjahr: 2050	Deutschland	Westdeutschland	Ostdeutschland
Substituierbare Menge natürlicher GK im Beton auf Basis des Bedarfes für den Neubau, (RESPOT) [Mio m ³ /a]	3,3	2,9	0,4
Menge an bereitstellbaren RC-GK, die mangels Bedarfs nicht in den Hochbau eingebracht werden kann („Lager“) [Mio m ³ /a]	6,2	5,0	1,2

Langfristig ist das maximale technische Ressourcenschonungspotenzial durch hochwertiges Recycling mit dem aus mineralischem Hochbauabfall gewinnbaren RC-Material vollständig erreichbar. Die Aufmerksamkeit verlagert sich auf die anwachsende Menge verfügbarer RC-Gesteinskörnungen, die aufgrund der rückläufigen Bautätigkeit nicht in den Bereich des Hochbaus rückführbar sind.

Die Quantifizierung erreichbarer Ressourcenschonungspotenziale zeigt eindrücklich die Notwendigkeit, im Bemühen um eine möglichst weitreichende Implementierung hochwertigen Recyclings den räumlichen und zeitlichen Aspekten einen besonderen Stellenwert einzuräumen. Räumliche und zeitliche Disparitäten prägen die zukünftige Gebäudebestandsentwicklung. Das sich dabei abzeichnende heterogene Bild macht die erheblichen Unterschiede deutlich, denen auf dem Weg zum höherwertigen Recycling vor dem Hintergrund langfristiger Planungserfordernisse bei der Rohstoffbereitstellung adäquate Beachtung entgegengebracht werden muss. Der vorgelegte Modellansatz liefert hierzu einen Beitrag einer regionalisierten prognostischen Modellierung relevanter Stoffkreisläufe. Die für die Interpretation der erreichbaren Ressourcenschonungspotenziale gesetzten Systemgrenzen erscheinen allerdings noch zu eng gezogen. So erfolgt eine Fokussierung auf die Recyclingstoffströme im Hochbau im engeren Sinne mit der Betrachtung abgehender Bauabfallströme aus dem Gebäudebestand, deren Erfassung und Aufbereitung, der Nachfrage nach Baustoffen im Gebäudeneubau sowie der dabei einbringbaren RC-Menge. Angelagerte Rohstoffquellen und -senken, die die Rahmenbedingungen des skizzierten Bereiches wesentlich mitbestimmen, konnten nicht berücksichtigt werden. Dies betrifft vor allem weitere, das Baustoffangebot beeinflussende Rohstoffe – bspw. verfügbare Primärgesteinskörnungen – aber auch das erheblich breitere Spektrum an möglichen „Senken“ für RC-Produkte. Hier bestehen Abhängigkeiten zum betrachteten System des hochwertigen Recyclings, die möglicherweise ähnlichen räumlichen und zeitlichen Disparitäten unterliegen. Überdies wird mit den Anwendungsfällen des Hochbaus, die vor allem auf anspruchsvolle Betone, aber damit nur auf einen begrenzten Ausschnitt an Betonanwendungen ausgerichtet sind, hochwertigem Recycling nur eine deutlich verengte Betrachtungsperspektive gegeben. Mengenbezogen interessante Einsatzbereiche bieten indes auch Betonanwendungen in den Bereichen des Tief-, Straßen- oder auch Gehweg-, Kanal- und Rohrleitungsbaus. Hier kann dem Anspruch nach hochwertiger Verwertung, oft wahrscheinlich sogar auf leichtere Weise, ebenso nachgekommen werden.

Vor dem Hintergrund langfristig disparater Entwicklungen wird die Stärkung der Planungssicherheit in Form einer Erweiterung der räumlich und zeitlich differenzierten Wissensbasis an Bedeutung gewinnen. Dies bedarf der konsequenten Weiterentwicklung von entsprechend ausgestalteten Analyseansätzen unter Berücksichtigung all jener Quellen und Senken, die wesentlich die Rahmenbedingungen eines hochwertigen Recyclings mitbestimmen.

Die vorliegende Studie fokussiert auf den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen als Betonzuschlagstoff im Hochbau. Dabei tritt u. a. die Bedeutung des Mischungsverhältnisses von Beton und Ziegel im einzubringenden RC-Granulat zutage. So beeinflusst der Ziegelanteil im RC-Zuschlag nach gültiger Zulassungspraxis die substituierbare Menge an Betonzuschlag nicht unwesentlich. Dieser Aspekt darf aber nicht allein im Hinblick auf die maximal zu erzielende Rohstoffsubstitution beim hochwertigen Recycling zur Betrachtung kommen. So greift eine Schlussfolgerung, bei ausreichender Verfügbarkeit an RC-Betongranulat auf eine Einbringung von Ziegelanteilen weitestgehend zu verzichten und damit die maximale technische Substitutionsmenge zu erreichen, zu kurz. Hierbei ist u. a. zu bedenken, dass für Ziegelbruch insgesamt eingeschränkte Verwertungsmöglichkeiten bestehen und sich der Bereich des Tiefbaus dabei nahezu ausschließt, während dies für Betongranulate nicht gilt.

Die Verwertung von Ziegelrezyklaten im Hochbau erhält in einem erweiterten Betrachtungsrahmen größere Bedeutung.

Hierbei kann beispielsweise auf Initiativen in Sachsen verwiesen werden, wo seitens des Finanzministeriums aktuell geprüft wird, inwieweit die Umsetzung des Passivhausstandards in öffentlichen Bauten unter Einbeziehung einer Verwertung bspw. auch für Ziegelsplitt erfolgen kann. Entgegen des bislang vorherrschenden Trends der Errichtung schlanker aber hochfester und gedämmter Wandkonstruktionen wird untersucht, ob adäquate funktionale Eigenschaften ebenso durch die Verwendung höher dimensionierter Wandquerschnitte erreicht werden können, die geringere Festigkeitsanforderungen an das Baumaterial stellen, dadurch aber auch höhere Einsatzanteile an Ziegelrezyklat gestatten und gleichzeitig bessere Dämmeigenschaften aufweisen würden¹⁰.

Mit der verfügbaren Technik und den entwickelten technischen Verfahren bestehen erhebliche Potenziale der verbesserten Kreislaufführung mineralischer Rohstoffe im Hochbau. In der Praxis wird hiervon jedoch bislang wenig Gebrauch gemacht. Neben regionalen Disparitäten im Anfall und Bedarf an RC-Material ist dies insbesondere auch auf eine mangelnde Wissensbasis und Akzeptanz bezüglich der Verwendung von Rezyklaten für Anwendungen im Hochbau zurückzuführen. Belege hierfür lieferten die im Rahmen des Vorhabens zahlreich geführten Expertengespräche. Ergänzend hierzu kann auf aktuelle Arbeiten im Auftrag des Umweltbundesamtes verwiesen werden, die sich schwerpunktmäßig diesen Fragen widmen (UBA 2008b). Darin wird darauf hingewiesen, dass, obgleich „das Recycling von mineralischen Abfällen heute schon eine große Rolle spielt, [...] noch zahlreiche Maßnahmen notwendig sind, um die Akzeptanz und die Marktstellung der Recyclingprodukte nachhal-

¹⁰ Hinweise von Herrn van Reimersdahl (Sächs. Staatsminist. für Finanzen) beim Fachgespräch „Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen“ am 20.01.2010 im Umweltbundesamt in Berlin.

tig zu verbessern“ (UBA 2008b:101). Vorgeschlagen werden Anstrengungen zur Schaffung neuer Absatzmärkte für hochwertige Anwendungen, die Herausstellung des Wertes von Recycling zur Schonung natürlicher Ressourcen entlang der gesamten Akteurskette, Ansätze zur Internalisierung externer Kosten, die Übernahme einer Vorreiter- und Vorbildrolle der öffentlichen Hand, klare Gesetzesvorgaben hinsichtlich der Gewährleistung, sowie Anstrengungen zur Sicherung von Güte und Qualität im gesamten Stoffkreislauf. Als ebenso erforderlich befunden wird eine Stärkung des Know-Hows und der Kompetenz auf der Einsatzseite durch gut kommunizierte, anwendungsorientierte Ausbildung und Forschung. Dies wird untermauert von Rechercheergebnissen die im Rahmen der vorliegenden Studie gemacht wurden, wonach die Thematik des Einsatzes rezyklierter Gesteinskörnungen als Betonzuschlagsstoff bisher kein durchgängiger Bestandteil der baukonstruktiven Lehre ist und die Vermittlung gangbarer Wege hochwertigen Recyclings damit nicht ausreichend erfolgt.

Die Verbreiterung der Wissensbasis auf unmittelbarer Akteursebene und die Steigerung der Akzeptanz ist damit eine der zentralen Herausforderungen im Rahmen einer Strategie zur Förderung des hochwertigen Recyclings.

In diesem Zusammenhang ist ein besonderes Augenmerk auf die Untermauerung des Begründungszusammenhangs zu legen. So gilt es nachvollziehbar darzustellen, dass durch die Verwendung von RC-Material im Hochbau diese Materialien anderen Einsatzfeldern, wie beispielsweise dem Straßenbau oder der Grubenverfüllung nicht zugleich entzogen werden und dort wiederum durch Naturmaterial kompensiert werden müssen. Auch Sachverhalten von adversen Effekten, bspw. aufgrund erhöhter Erfordernisse an Zement bei der Nutzung von Sekundärgesteinskörnungen im Betonbau muss dabei weitere Beachtung geschenkt werden.

Eine erweiterte Quantifizierung entlang des bereits eingeforderten Ansatzes unter Einbeziehung weiterer Quellen und Senken bietet hier einen wichtigen Einstiegspunkt. Sie muss neben dem Bereich des Hochbaus insbesondere auch die Verwertungsoptionen des Tiefbaus mit einbeziehen. Steigende Abgangsmengen im Hochbau und rückläufige Investitionstätigkeiten im Tiefbau könnten hier zu Mengenverhältnissen führen, die die Stellung des hochwertigen Recyclings deutlich stärken. Auch gilt es in diesem Zusammenhang kritisch zu hinterfragen, inwieweit die im Tiefbau eingesetzten RC-Materialien in der vorgenommenen Weise konstruktiv zu rechtfertigen sind. Möglicherweise lenkt der Tief- bzw. Straßenbau mit seinen hohen Verwertungsmengen von den Grundfragen ab, die auf eine ressourcenschonende Errichtung und Erneuerung von technischen Infrastrukturen orientieren. Ähnliches gilt für den Bereich der Rekultivierung von Abbauflächen, worauf bereits in (UBA 2008b) hingewiesen wird.

Ein erweiterter und um die genannten Aspekte angereicherter Bilanzierungsansatz wird die Durchlässigkeit von RC-GK zwischen Hochbau und Tiefbau stärker in den Vordergrund stellen müssen. Recycling sollte gesamtwirtschaftlich und über alle möglichen Anwendungsfälle hinweg betrachtet werden, bevor die Rohstoffsubstitution entlang von Absatzlinien optimiert wird.

Die Frage nach der ökologischen Bedeutung des hochwertigen Recyclings ist allerdings vielschichtig zu erörtern. Die vorliegenden Argumente hinsichtlich der Umweltwirkungen aus

einem potenziell erhöhten Zementbedarf, der nach derzeitigem Praxisstand nicht auszuschließen ist, wiegen schwer. Einfache Schätzungen einer verminderten Flächenneuanspruchnahme aus Tagebauaktivitäten zur Bereitstellung von Primärmaterial tragen nur bedingt dazu bei, diese zu entkräften. Eine umfassende Bilanzierung der Umweltwirkungen im Sinne einer Ökobilanz könnte helfen, diese Diskussion zu versachlichen und bestehende Missstände besser zu adressieren. Dabei ist ein besonderes Augenmerk auf die Verwendung geeigneter Indikatoren zu richten, entlang derer die unterschiedlichen Wirkungskategorien dargestellt werden. Die besondere Bedeutung und Herausforderung liegt dann in der Interpretation der zu erwartenden Ergebnisse. Keinesfalls darf aus einem Umweltwirkungsprofil, das keine eindeutige Empfehlung für hochwertiges Recycling zulässt, vorschnell der Schluss gezogen werden, die Anstrengungen in dieser Richtung zu verringern. Es ist zu bedenken, dass es sich bei den das hochwertige Recycling begünstigenden technologischen Entwicklungen noch um vergleichsweise „junge“ Technologien handelt, die sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden. Experten sehen hier noch erhebliche Entwicklungschancen bei der Rezyklatgewinnung sowie der Baustoffherstellung mit Sekundärmaterial. Bilanzielle Nachteile gegenüber bereits etablierten und entsprechend optimierten Ansätzen, die für Technologien in frühen Entwicklungsstadien typisch sind (s. auch Entwicklungsgeschichte der Solartechnologie) dürfen nicht zwangsweise zum vorschnellen Abbruch der laufenden Entwicklungen führen. Vielmehr zeigt sich, dass Lernkurveneffekte bei der Etablierung von Technologien erheblich zur Senkung der ökobilanziellen Wirkungspotenziale beitragen.

Ergebnisse einer ökobilanziellen Betrachtung können wertvolle Hinweise geben, in welche Richtung Anstrengungen der technologischen Weiterentwicklung der Aufbereitungstechnik sowie der Technologie der Baustoffherstellung gelenkt werden müssten, um möglicherweise bestehende ökobilanzielle Nachteile der Bauabfallverwertung im Hochbaubereich gegenüber konventionellen Primärbaustoffanwendungen und weiteren Recyclingoptionen abzubauen.

Abstract

The utilization of waste materials represents an important contribution to the protection of natural resources. This especially holds true in regard to high-grade recycling, which envisions to use wastes as secondary material and to achieve the closest possible product cycles and which, consequently, has become a major goal for waste management in the European Waste Framework Directive (2008/98/EC, Article 11) as well as in the current working draft of the German Recycling Act (KrWG, § 8), which is based on the said directive. The construction industry is of particular significance due to the mass flows it creates and the potentials it incorporates to get materials return into the resource cycle.

For future mass flows in the construction industry, the development of the building stock is of decisive importance. This development will mainly be determined by demographic and economic conditions. At present, these conditions are subject to great changes. Thus, in Germany it is expected that there will be enormous spatial and temporal disparities in regard to the development of building stock in the up-coming years. Based on the fact that recycling cycles of building materials are faced with distance limits, the material flow balances as well as the volume potential for the high-grade usage of construction waste in building construction vary greatly at the regional level.

Objective

The aim of the present study is to explore the medium (year 2020) and long-term (year 2050) expected potentials of high-grade recycling of mineral construction waste. Here the question is answered, especially in regard to the mass construction material of concrete, as to what extent recycling "from building construction back into building construction" could occur and what resource conservation potentials this would make accessible. The main subjects under consideration are the aggregates in the concrete used for constructing buildings. To this end, there is an accounting of the mass flow which focuses on juxtaposing the deployable, future amounts of suitable construction waste recyclates with the need for aggregates and the amount of corresponding gravel materials that can be substituted by recycled building rubble.

Development of a Material Flow Model

The quantification of recycling-relevant material flows is done via regionalized model calculations, using a material flow model developed expressly for this purpose. For medium-term considerations, regionalization takes place at the level of districts, which have been summarized on the basis of their areal specify. As for long-term perspectives, regionalized statements can solely be made in regard to the differentiation between Eastern and Western Germany.

The material flow model consists of several model components which are based on each other, in which recycling-relevant material flows are calculated and are later transferred as initial values to subsequent model components (Figure 0-1).

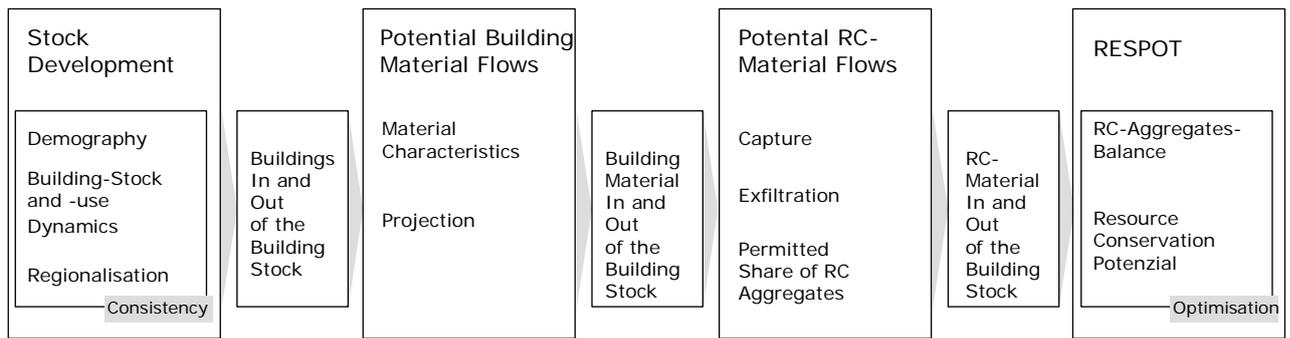


Figure 0-1: An Overview of the Material Flow Model "Resource Conservation Potential"

The model component "stock development" serves to illustrate possible future development of the building stock (in and out of the residential and commercial building stock) at the regional level. The assessment of regional changes in housing stock relies on the aggregated projections of Banse and Effenberger (2006). These assessments are projected in accordance with the relevant parameters used for describing the housing supply, housing demand as well as any resultant insights into the utilization of building stock at the level of area typology. On the other hand, the procedure employed for the field of commercial building is based on hypothetically formulated statistical values of the development of building stock. According to them, the housing stock will continue to grow in the medium term in Western Germany and in districts in Eastern Germany characterized by tendencies towards suburbanization. However, in Eastern Germany, there are mainly found area types (AT), in which the housing demolition figures exceed the number of new building being built. In the long term, the demolition of the housing stock will exceed new construction almost every-where (Table 0-1).

Table 0-1: Assumptions for the Increase (New Buildings) and the Decrease (Demolition) in the Building Stock

Housing Stock Changes in 2020 (1000 apartments / year)									
	Germany	Western Germany				Eastern Germany			
		Total	AT1	AT2	AT3	Gesamt	AT4	AT5	AT6
New Buildings	204	187	51	25	111	17	3	9	5
Demolished Buildings	113	63	23	10	31	50	11	35	4
New/Demolished	1,8	3,0	2,2	2,5	3,6	0,3	0,3	0,3	1,3

AT1: urban centers; AT2: districts with a low dynamic, AT3: districts with a greater dynamic, AT 4: urban centers, AT 5: sparsely populated and often peripheral, AT6: countryside districts with tendencies towards suburbanization

Housing Stock Changes in 2050 (1000 apartments/ year)			
	Germany	Western Germany	Eastern Germany
New Buildings	107	94	13
Demolished Buildings	282	232	50
New / Demolished	0,4	0,4	0,3

For commercial building stock, it is assumed that it will increase in both Western and Eastern Germany (Table 0-2).

Table 0-2: Assumptions for the Change in Stock of Commercial Buildings

Changes in the Stock of Commercial Buildings in 2020 (1000 buildings/year)									
	Germany	Western Germany				Eastern Germany			
		Total	AT1	AT2	AT3	Total	AT4	AT5	AT6
New Buildings	36,0	31,0	8,8	5,7	16,5	5,0	0,8	3,4	0,7
Demolished Buildings	16,2	13,9	4,0	2,6	7,4	2,2	0,4	1,5	0,3
New/Demolished	2,2								

AT1: urban centers; AT2: districts with a low dynamic, AT3: districts with a greater dynamic, AT 4: urban centers, AT 5: sparsely populated and often peripheral, AT6: countryside districts with tendencies towards suburbanization

Changes in the Stock of Commercial Buildings in 2050 (1000 buildings/year)			
	Germany	Western Germany	Eastern Germany
New Buildings	26,0	23,0	3,1
Demolished Buildings	11,9	10,5	1,4
New/Demolished	2,2		

The subject-matter of the model component "Potential Building Material Flows" is to convert the previously estimated development of building stock for various area types into building material mass flows. The focus here is on recycling-relevant building material¹¹. To this end, a calculation method is used, which is based on the material characteristics of typological buildings. For residential buildings, material characteristics of typological buildings based on existing studies can be formulated. For commercial buildings, the values here are determined hypothetically on the basis of data concerning construction activity.

On the basis of the amount of recycling-relevant construction materials, the model component "Potential RC Material Flows" calculates the volume of supply of recycling aggregates which can be recovered from the outgoing construction waste flows via reprocessing as well as the usage amount of recycling aggregates, which could be incorporated under the current standard and control requisites into the concrete under demand by the construction industry. The calculating of the supply side is based on estimates regarding the proportion of recycling-relevant fractions of concrete and brick from the outgoing construction waste as well as estimates concerning the proportion of unsuitable components segregated in the process of material reprocessing. The limits of technical practicality represent the primary references for that. With currently available technology (for assumptions see Table 0-3) approximately 48 % of the outgoing quantity of recycling-relevant building material can be made available as RC aggregates for building construction purposes. In the concrete of ordinary buildings, a maximum of 25 % - 32 % of the total volume can be incorporated in the form of RC aggregates in accordance with effective technical regulations depending on the concentration of brick tile parts.

¹¹ Recycling-relevant building material: concrete and bricks of the output-material-flow (used to produce RC-aggregates) as well as concrete of the input-material-flow (where RC-aggregates can be added)

Table 0-3: Basic Assumptions Regarding the Recovery and Use of RC Material

Recovery of RC material from the outgoing construction mass flow	20 % capture loss 40 exfiltration during reprocessing	
Use of RC-GK in concrete for new structures	In relation to the volume of GK in concrete	In relation to the total volume of concrete
	45% volume in delivery type L* and L1	32% volume in delivery type L* and L1
	35% volume in delivery type L2	25% volume in delivery type L2

Volume percentages (RC-concrete chippings: RC-crushed brick) in the delivery types: L *: 100:0, L1: 90:10, L2: 70:30; The volume fraction of aggregate in the concrete is set at 72%.

The model component RESPOT balances the calculated supply and the usable quantity of recycled aggregates and thus determines the actual usable amount of RC-aggregates in building construction under given constellations of the housing stock development. The resource conservation potential corresponds to the volume of natural gravel material, whose use in the production of concrete for buildings may be waived on account of this substitution. The maximum technical substitution potential, which could be achieved under the assumption of unlimited available quantities of recycled aggregates, provides a reference value that has been used for benchmarking the above findings. If the RESPOT falls below this reference value, optimization scenarios can be simulated with the model and thus approaches for the improved exploitation of resource conservation potentials derived. Such optimization may for example include adjustments of the deployed type of re-cycled aggregate, depending on the prevailing supply-demand conditions in the area type structures or alternative assumptions for the recovery and usage rate of RC-material).

The model calculations show that in assuming building stock developments as have been established in the medium-term for Western Germany, the potential demand for recycled aggregate cannot be met by the available supply. The dynamic of new building construction, in part, greatly surpasses the demolition intensity in the corresponding area types. Seen in relation to high-grade recycling, there thus exists a lack of appropriate RC materials from building construction. In contrast, for large parts of Eastern Germany, where the regions mainly exhibit a comparatively low new construction rate and a high level of demolition activity, an excess of recycled aggregate can be observed if the analysis is strictly limited to high-grade recycling using and recycling material only in the field of building construction. One exception to this are the “countryside districts with tendencies towards suburbanization,” in which in a weakened form similar changes of housing stock development can be observed compared to that in Western Germany. If the potential resulting from the application of technical and normative limits as well as from the expected material supply at regional level is used for high-grade recycling, then in 2020 a volume of 4.1 million m³ /year of natural gravel may be substituted by recycled aggregates. An additional 1.8 million m³ potentially recoverable aggregates cannot be accommodated by building construction for purposes of high-grade recycling. These reserves are mostly located in Eastern Germany (Table 0-4).

Table 0-4: Resource Conservation Potential and Future "Storage Sites" in 2020

Reference year: 2020	Germany	Western Germany	Eastern Germany
Substitutable amount of natural gravel in the concrete on the basis of the demand for new construction, (RESPOT) [million m ³ / year]	4,1	3,6	0,6
Quantity of deployable recycled aggregates, which through lack of demand cannot be incorporated into building construction ("storage sites") [million m ³ / year]	1,8	0,5	1,3

With an exclusive focus on the use of recoverable RC material from mineral construction waste being used as aggregates in building construction, incongruent tendencies will develop in Germany in the medium-term: in some regions there would be surplus amounts of RC material for high-grade usage while, simultaneously, in other regions there would be a shortage of them.

These regional disparities cannot be resolved because the recycling of construction materials is only economically feasible in strict spatial boundaries. Rather, they require a regionalized approach, as is illustrated by this study. Only then is it meaningfully possible to capture and exploit the potentials for recycling in building construction in an adequate manner.

However, recycled aggregates from mineral C&D waste with different amounts of concrete and brick elements can be used. The permitted share of the various material components is currently regulated in Germany by DIN 4226-100, which sets the requirements for aggregate delivery types. Depending on the delivery type used, certain admixture amounts of recycled aggregate in concrete are allowed from an engineering perspective. With an increased brick proportion in the recycled aggregate, the maximum admixture level decreases in the concrete. Without special authorization, currently the highest substitution level that can be achieved by using recycled aggregate is one in which at least 90 % of its weight consists of re-cycled concrete parts. However, this presupposes having the adequate local availability of suitable concrete material from demolition activities. But if the available RC concrete material is not sufficient enough to allow for the maximum technically permissible substitution level in the concrete under demand, then it can be advantageous in regard to maximizing resource conservation to make use of recycled aggregates with a higher brick content, even though the permissible admixture amount per unit of concrete would be reduced by doing so. This potential reserve can be detected in the area types that are characterized by a clear lack of recycled aggregate in the medium-term.

The compositions of recycled aggregates that are permitted to be used in concrete have a considerable influence in the medium-term on the resource conservation potential that can be achieved through high-grade recycling. Whether a better exploitation of the resource conservation potential can be brought about through the use of variously composed aggregates, is dependent on the ratio between the available supply of recycled aggregates and the amount that can be incorporated resulting from the demand for concrete. This ratio varies greatly at the regional level in the medium-term.

In addition to the exertion of influence on the input-side, for example by deliberately raising the use of mineral materials that do not stem from concrete in the re-cycled aggregate and

ways of increasing the admixture rates, optimizations in the collection and processing of outgoing construction waste represent obvious starting points for further increasing the resource conservation potential through high-grade recycling.

The model assumptions for the recovery of sorted concrete and brick fractions and for the producibility of suitable recycled aggregates through the exclusion of unsuitable material content (see Table 0-3) meet the ambitious limits of technical feasibility in light of contemporary conditions. Here achieving a further optimization would at present be associated with a disproportionately high amount of effort and would possibly also increase the risk of a drop in the quality of RC-materials generated. As a starting point for further increasing the achievable resource conservation potential, these points of intervention are thus of secondary importance for the time being.

Seen from a long-term perspective, the relations between the material output from existing buildings and the material input into the building stock will be shifting. From the emerging demographic dynamics it can be derived that in 2050, particularly in housing, the number of buildings being demolished will clearly exceed the number of new buildings being built almost everywhere. Possibly, the commercial building stock will continue to grow in the long-term but only with a much lower momentum when compared with the medium-term perspective. This will reduce in the long-term the maximum level of resource conservation potential that can be achieved in building construction through high-grade recycling. Both in the Eastern and Western parts of Germany, the technically imposed upper limit of the substitution of concrete additive can be achieved with the potentially available RC material. The model calculations reveal that the achievable resource conservation potential for the year 2050 is 3.3 million m³. This represents a decrease of about 20% in comparison with the corresponding value from the year 2020. At the same time, in the long-term this would - in terms of high-grade recycling - represent an oversupply of recycled aggregate nationwide. This is estimated for 2050 to be 6.2 million m³/year, thus representing an increase by a factor of 3.4 as compared to the value reported for the year 2020.

Table 0-5: Resource Conservation Potential and Future "Storage Sites" in 2050

Reference year: 2050	Germany	Western Germany	Eastern Germany
Substitutable amount of natural gravel in concrete on the basis of the need for new building (RESPOT) [m. m ³ /year]	3,3	2,9	0,4
Amount of deployable recycled aggregate, which due to a lack of need cannot be incorporated into building construction ("storage sites") [m. m ³ /year]	6,2	5,0	1,2

In the long-term, the maximum technical resource conservation potential via high-grade recycling with the recycled aggregate obtainable from mineral construction waste is fully achievable. The attention is shifting to the growing amount of available RC-materials, which as a result of declining construction activity cannot be incorporated in building construction.

Quantifying the achievable resource conservation potential clearly indicates the necessity of granting spatial and temporal aspects a special status in the interests of the broadest possi-

ble implementation of high-grade recycling. Spatial and temporal disparities characterize the future building stocks. The emerging heterogeneous view here illuminates the significant differences, which will have been adequately taken into account on the path leading to high-grade recycling. The model presented thus makes a contribution to the regionalized predictive modelling of relevant material cycles. The system limitations for the interpretation of the achievable resource conservation potential still appear to have been made in too restrictive a manner, though. Among others, an emphasis is placed on recycling material flows in building construction in the strict sense of the word by examining construction waste flows out of the building stock, their collection and processing, the demand for building materials in building construction and the quantity of recycled aggregate to be introduced. Associated raw material sources and deployment areas, which greatly determine the framework for the achievable resource conservation, could not be taken into consideration. This concerns above all additional types of raw material which affect the supply side of building material -for example, the available amount of primary aggregates - but also the considerably wider range of possible options for RC usage. Here, exist dependencies in regard to the studied approach of high-grade recycling, which may be subject to similar spatial and temporal disparities. Moreover, the building construction sector, which above all is focused on more demanding types of concrete but with them on a rather limited spectrum of concrete applications only, is giving high-grade recycling only a significantly narrowed perspective. In terms of quantity, however, interesting fields are also offered with concrete applications in the area of civil engineering as well as in the fields of road, sidewalk, sewer and pipeline construction. Here, the demand for the high-grade utilization of RC-material can be met, often probably in an even easier way.

Against the backdrop of long-term disparate developments, the strengthening of planning security will gain in importance in the form of an extension of the spatially and temporally differentiated knowledge basis. This requires the consistent further development of appropriately formulated analysis approaches, taking into account all those sources and options which have a significant influence on the framework for high-grade recycling.

The present study focuses on the use of recycled aggregate in building construction. Here, among other things, the importance of the ratio of concrete and brick to be incorporated in the recycled aggregates becomes evident. Especially the proportion of brick components in the recycled aggregate significantly affects the substitutable amount of natural gravel in accordance with authorized practice. This aspect, however, should not only be considered in terms of the maximum amount of raw material substitution to be achieved in the context of high-grade recycling. It is therefore short-sighted to reach the conclusion that, when there is sufficient availability of recycled concrete, incorporating brick components should be refrained from to the greatest possible extent so as to achieve the maximum technical substitution amount. Here, among other things, it is important to remember that there is a restricted number of ways to utilize scrap bricks with many fields of civil engineering such as road base construction nearly ruled out while this does not hold true for recycled concrete.

The recycling of used brick in building construction becomes more important in the extended perspective and broader look on things.

Here, for instance, mention can be made of initiatives in Saxony, where the Ministry of Finance is currently assessing to what extent the passive house standard in public buildings can be implemented while also incorporating, for example, the recovery of brick chippings. Contrary to the hitherto prevailing trends of constructing thin but high-strength and insulated wall structures, it will be investigated whether adequate functional properties can be achieved just by using higher-dimension wall sections that provide lower strength requirements for the building materials, which would thus allow for an even greater use of brick recycles while, simultaneously exhibiting better insulation properties.

With the available technology and developed technical processes, there exists considerable potential for the improved recycling of mineral C&D waste in building construction. In practice, however, little use has been made of it. In addition to regional disparities in the available amount of and the need for recycled aggregate, this can also especially be attributed to a lacking knowledge basis and poor acceptance regarding the use of recycled matter for applications in building construction. Evidence for this was provided by the numerous discussions with experts which took place in the context of the project. Additionally, mention can be made of the work currently being carried out on behalf of the German Federal Environment Agency on these issues (UBA, 2008b). These studies indicate that, although "the recycling of mineral waste already plays a major role today, [...] there are still many measures that need to be taken in order to improve the acceptance and the market position of recycled products in a lasting manner" (UBA 2008b: 101). Efforts are proposed here for creating new markets for high-quality applications, highlighting the value of recycling, conserving natural resources involving the complete chain of actors, internalizing external costs, having public authorities adopt a pioneering and exemplary role, establishing clear legal requirements in terms of guarantees as well as ensuring quality within the entire material cycle. It has also been deemed just as necessary to strengthen know-how and competence in praxis via well-communicated, application-oriented education and research. This is supported by findings obtained in the course of the present study, according to which the subject matter of the use of recycled aggregates in concrete has so far not been a consistent part of the relevant technical education and the dissemination of viable ways of carrying out high-grade recycling is hence not sufficient.

The broadening of the knowledge base on the level of immediate actors and an increasing acceptance thus represents one of the central challenges in the context of a strategy for promoting high-grade recycling.

In this context, particular attention should also be paid to supporting the context of justification. Thus, it should be illustrated in an understandable manner that through the use of RC material in building construction, these materials would not be withdrawn at the same time from other fields of application such as, for instance, road construction and backfilling and there, once again, they have to be compensated by natural materials. Even issues of adverse effects (e.g. due to increased requirements for cement in the use of secondary aggregates in concrete construction) must be given further attention.

An extended quantification in accordance with the approach that incorporates other sources and utilization options as mentioned earlier provides an important entry point here. In addi-

tion to the field of building construction, it must also incorporate in particular the recycling alternatives in the field of civil engineering. Increasing material outputs in building construction and declining investment activity in the field of civil engineering could lead here to volume ratios that might significantly strengthen the position of high-grade recycling. In this context, it is also important to analyze critically the extent to which RC materials used in the aforementioned manner by civil engineering can be constructively justified. Possibly, civil engineering and road constructions along with their high recycling quantities are distracting from the fundamental issues focused on resource-conserving construction and restructuring of technical infrastructures. The same applies to the reclamation of mining areas, which has already been referred to in (UBA, 2008b).

An enhanced accounting approach enriched by other relevant aspects will have to place more emphasis on the free interchange of recycled aggregate between building construction and civil engineering. Recycling should be seen from a macroeconomic perspective, taking into account all possible forms of applications, before optimizing the raw material substitution in accordance with specific applications.

The question of the ecological importance of high-grade recycling is certainly a complex issue to discuss. These arguments presented about the environmental consequences resulting from a potential increased demand for cement, which can-not be excluded in light of current practical realities, weigh heavily. Simple estimates of a reduced amount of new land being used from surface mining activities for providing raw materials are only of limited help to rebut this. A full accounting of the environmental impacts in the sense of an environmental performance evaluation could help make the discussion more objective and better address existing shortcomings. Close attention here should be paid to the use of appropriate indicators, by which the different impact categories are to be represented. The special significance and challenge then lies in interpreting to be expected. Under no circumstances should it rashly be concluded, on the basis of an environmental effect profile that does not admit an unambiguous recommendation in favour of high-grade recycling, to reduce the efforts being made in this direction. It is important to re-member that the technological developments beneficial to high-grade recycling are still comparatively "young" and that these technologies are yet at an early stage of development. Experts still see here considerable opportunities for development in regard to RC utilization and also in regard to the production of building materials with secondary materials. Accounting disadvantages in comparison with the already established and optimized approaches, which are typical for technologies in early stages of development (see also the history of the development of solar technology), shall not necessarily lead to the premature termination of ongoing developments. It is rather more often the case that learning curve effects contribute significantly to the establishment of technologies for reducing the eco-balance effects.

The results of an ecologically balanced analysis can give valuable clues as to the direction in which efforts of technological development of reprocessing technology and the technology of producing building materials should be directed so as to possibly reduce existing ecologically balanced disadvantages of recovering construction waste in the field of building construction in comparison with conventional primary building material applications and additional recycling options.

1 Einführung

In der Geschichte der Menschheit wurden schon immer sekundäre Baustoffe aus nicht mehr genutzter Bausubstanz gewonnen und diese bei der Neuerrichtung von Bauwerken wiederverwendet oder weiterverwertet. Ausgrabungen und historische Gebäude zeigen oft sehr anschaulich, dass Materialien aus verschiedenen Bauzeitaltern in den Bauten Verwendung gefunden haben, sei es in Form komplett erhaltener Bauteile, als Bruchstücke oder als Füll- und Zuschlagsstoffe. Die Veranlassung zu diesem Vorgehen gaben wohl kaum Zielstellungen der Umweltschonung als vielmehr Rohstoffknappheit und wirtschaftliche Nöte. Ausgesprochen bildhaft hierfür steht die massenhafte Wiederverwendung von Trümmersmaterial aus dem kriegszerstörten Gebäudebestand für den Wiederaufbau und die Neuerrichtung von kompletten Wohnhäusern und Straßenzügen in den unmittelbaren Aufbaujahren nach den beiden Weltkriegsereignissen. Dass die meisten dieser Bauwerke eine „Lebensdauer“ erreicht haben, die der von Gebäuden gleichkommt, welche ohne solche Sekundärbaustoffe errichtet wurden, zeugt von der grundsätzlichen Möglichkeit, die Dauerhaftigkeit und Nutzungssicherheit von Bauwerken auch mit dieser Art des Bauens gewährleisten zu können.

Mit zunehmender Wirtschaftskraft und immer effizienteren Produktionstechniken geriet die Wiederverwendung von Stoffen im Bereich des Bauens immer mehr in Vergessenheit. Insbesondere für die mineralischen Massenbaustoffe konnten natürliche Vorkommen in einem auf lange Sicht auskömmlichen Umfang erkundet und erschlossen werden. Heute, im Ergebnis einer wahrnehmbaren Verknappung und offensichtlich gewordenen Endlichkeit wichtiger Ressourcen, wie z. B. einigen Metallen oder den fossilen Brennstoffen, gewinnt die Einsicht wieder an Bedeutung, dass auch Abfallstoffe einen Wert besitzen, und sich primäre Rohstoffe damit ersetzen und Vorräte schonen lassen. Außerdem ist es gesellschaftlich und volkswirtschaftlich inzwischen gleichermaßen von Bedeutung, dass sich hierdurch die Inanspruchnahme von Flächen sowie Belastungen und Zerstörungen, die beim Abbau von Primärrohstoffen, aber auch bei der Lagerung von Abfällen entstehen, verringern lassen. Mit der Umsetzung des so genannten Kreislaufwirtschaftsprinzips wird versucht, diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen.

Aufgrund der enormen Stoffflüsse, die bei der Entwicklung des Gebäudebestandes verursacht werden, kommt dem Bereich des Bauens in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu. Von der Bundesregierung vorgestellte Schätzungen beziffern das Materiallager im Wohnbestand von deutschen Städten und Gemeinden auf ca. 10,5 Mrd. Tonnen mineralische Baustoffe und prognostizieren ein weiteres Wachstum dieses Lagers (20 % bis 2020) (Die Bundesregierung 2008:13)¹². Allein im Jahr 2000 wurden nach vorliegenden Hochrechnungen nahezu 150 Mio. t an mineralischen Baumaterialien in den Wohngebäudebestand eingebracht (Buchert et al. 2004:116). An abgehender Menge weist der aktuelle Monitoring-Bericht des Kreislaufwirtschaftsträgers Bau für das Jahr 2004 u. a. 50,5 Mio. t Bauschutt aus (KWTB 2007:16). Hiervon wurden 62 % aufbereitet und als Recycling-Baustoff wieder bei Baumaßnahmen eingesetzt, bei einem überwiegenden Teil betrifft dies jedoch Verwendungswege, die im Allgemeinen als geringwertig eingestuft werden (aktuell

¹² 220 Mio. Tonnen Holz und 100 Mio. Tonnen Metalle

siehe hierzu z. B. Petschow 2008, Knappe 2008). Die auf europäischer und nationaler Ebene deklarierten Zielstellungen einer nachhaltigen Ressourcennutzung und weitgehenden Kreislaufführung sind damit noch nicht in zufriedenstellender Weise reflektiert. Die Ansprüche einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft, wie sie laut Kreislaufwirtschaftsgesetz u. a. mittels hochwertiger Verwertung und Wiedereinbindung anfallender Abfallstoffen in Erzeugnisse anzustreben ist, werden derzeit im Bauwesen noch ungenügend erfüllt. Erhebliche Mengen an mineralischen Bauschuttmaterialien kommen nicht wieder im konstruktiven Bereich, also dort, wo sie erst zu Abfall geworden sind, zur Verwendung. Stattdessen erfolgt hauptsächlich eine Verwertung auf deutlich niedrigerer Qualitätsstufe, als Schüttgut, lose Bettung, beim Deponiebau und als Verfüllmaterial (s. auch UBA 2008b).

Beim Verfolgen der Zielrichtung, die anfallenden Bauschuttmaterialien einer hochwertigen Verwertung (aus dem Hochbau in den Hochbau) zuzuführen, ist zunächst zu klären, welches Potenzial vor dem Hintergrund der zukünftigen Gebäudebestandsentwicklung hierfür zur Verfügung steht. Hierbei sind verfahrenstechnische und logistische Aspekte zu beachten. Neben der Klärung, ob und wie Bauabfälle in hochwertig recycelbarer Form erfasst und bereitgestellt werden können, kommt bei der Stoffstromlogistik der Raumbezug zum Tragen. Kreisläufe der Recyclingwirtschaft im Bauwesen unterliegen in ihrer räumlichen Ausdehnung aufgrund der vergleichsweise geringen erzielbaren Wertschöpfung regionalen Begrenzungen (siehe hierzu u. a. BBS 2006:20, Bilitewski et al. 1995).

Vorliegenden Hochrechnungen folgend wird die Stoffflussbilanz der Gebäudebestandsentwicklung Deutschlands in den kommenden Jahren positiv ausfallen. Das anthropogene Stofflager im Gebäudebestand wird voraussichtlich weiter ansteigen (s. Öko-Institut 2006: 102). Es sind jedoch erhebliche räumliche Disparitäten zu erwarten. Demografische und wirtschaftliche Strukturveränderungen der letzten Jahre verliefen in Deutschland sehr unterschiedlich. Sowohl im Vergleich der Bundesländer, wie auch regional und teilräumlich, waren abweichende, zum Teil gegenläufige demografische Entwicklungen zu beobachten (u. a. Müller, Siedentop 2004:15 ff., BBR 2005a). Auch die zukünftige Entwicklung wird geprägt sein von räumlichen und zeitlichen Disparitäten (BBR 2009; Effenberger, Deilmann 2004).

Stoffstrombilanzen im Bausektor können deshalb regional sehr unterschiedlich ausfallen. Das für Wachstumsregionen typische, bereits von Baccini und Brunner (Baccini, Brunner 1991) aufgezeigte deutlich positive Verhältnis von Input- zu Outputstoffstrom in den Gebäudebestand kann sich in Schrumpfungsregionen ins genaue Gegenteil verkehren. Zukünftig wird es vermutlich beides geben - Regionen mit deutlichem Materialinputüberschuss im Gebäudesektor, und Regionen, deren Baumassenströme der Bestandsentwicklung deutlich von der Outputseite dominiert werden. Hieraus können regional sehr unterschiedliche Herausforderungen und Möglichkeiten für die Sekundärrohstoffwirtschaft erwachsen.

1.1 Zielstellung und begriffliche Einordnung

Übergeordnetes Ziel des Vorhabens ist es, unter Berücksichtigung der sich abzeichnenden demografischen Veränderungen Potenziale für ein hochwertiges, ressourcenschonendes Recycling im Baubereich aufzuzeigen.. Ausgehend von den aus der zukünftigen Gebäudebestandsentwicklung resultierenden Stoffflüssen soll im Rahmen von Modellbetrachtungen

eine quantitative Abschätzung des Ressourcenschonungspotenzials durch hochwertiges Recycling erfolgen.

Das Ressourcenschonungspotenzial (RESPOT) wird als Potenzial einer möglichen Schonung natürlicher Ressourcen interpretiert. Innerhalb des breit auslegbaren Ressourcenbegriffs bilden die für Bautätigkeiten zum Abbau kommenden natürlichen mineralischen Grundbaustoffe den Betrachtungsfokus. Das ermittelte Ressourcenschonungspotenzial definiert sich somit über die potenziell vermeidbare Menge an im Hochbau eingesetzten natürlichen Gesteinskörnungen, die durch hochwertiges Recycling erreichbar ist.

„Hochwertiges Recycling“ bezeichnet dabei eine Kreislaufführung im Hochbau, die auf der erneuten Nutzung mineralischer Fraktionen im Hochbau beruht. Hochwertiges Recycling kann damit im Wesentlichen durch den Einsatz von Recycling-Gesteinskörnungen (RC-GK) in Betonen erfolgen, die im Hochbau eingesetzt werden.

1.2 Forschungsansatz und Gliederung des Forschungsberichtes

Um dem Umstand räumlich begrenzter mineralischer RC-Baustoffkreisläufe gerecht zu werden, verfolgt das Vorhaben einen regionalisierten Ansatz. Die Regionalisierung berücksichtigt die räumlich spezifischen Ausprägungen der Gebäudebestandsstruktur sowie die regional unterschiedlichen Ausprägungen der Dynamik von Bevölkerungs- und Gebäudebestandsveränderungen. Die Bearbeitung erfolgt entlang einer Raumtypengliederung, wobei die Raumtypen spezifische Ausprägungen des demografischen Wandels charakterisieren. Diese Regionalisierung ist für den Zeitschnitt 2020 möglich. Für den Zeitschnitt 2050 wird auf Grund zu großer Unsicherheiten eine Unterscheidung nach Ostdeutschland und Westdeutschland vorgenommen. Auf dieser Ebene können auch langfristig Entwicklungstrends unterschieden werden, da die Wohnungsmärkte durch sehr unterschiedliche Ausgangsbedingungen zum Zeitpunkt der Wiedervereinigung und sehr unterschiedlicher Entwicklung langfristig geprägt sind.

Zur Schätzung zukünftiger Ressourcenschonungspotenziale (RESPOT) durch hochwertiges Recycling im Bauwesen werden Modellbetrachtungen durchgeführt. Gesucht wird nach dem Potenzial, das sich unter Beachtung vorhandener technischer Möglichkeiten der Aufbereitungstechnik sowie derzeit geltender Normen und Empfehlungen für den Einsatz von RC-GK in Betonen theoretisch ermitteln lässt. Hierzu wird ein Stoffstrommodell aufgebaut, das die Simulation der relevanten Stoffstromzusammenhänge des hochwertigen Recyclings im Hochbau ermöglicht. Ausgehend von der Dynamik im Gebäudebestand, die in Zu- und -abgängen an Gebäuden und Wohnungen zum Ausdruck kommt, wird ein Bogen gespannt zwischen dem Bauabfallanfall, der aus den Gebäude- und Wohnungsabgängen resultierenden und der aus der Baustoffnachfrage des Zubaus resultierenden potenziellen Einsatzmenge an RC-Gesteinskörnungen. Die potenzielle Einsatzmenge an RC-Gesteinskörnungen wird mit der potenziell gewinnbaren Menge an RC-Gesteinskörnungen aus dem Gebäudeabgang bilanziert, um hieraus die unter gegebenen Angebots- und Nachfragebedingungen¹³ erreich-

¹³ Im Sinne von potenzieller Nachfrage unter der Annahme, dass das durch geltende Regelwerke mögliche Potenzial der Substitution natürlicher GK durch RC-GK bei der Betonherstellung genutzt wird. Im Folgenden wird „Nachfrage nach RC-GK“ in diesem Sinne interpretiert.

bare substituierbare Menge an natürlichen GK zu berechnen und das resultierende RESPOT einzuschätzen.

Im folgenden Abschnitt 1.3 wird das modellgestützte Vorgehen im Überblick dargestellt, bevor die einzelnen Modellkomponenten im Detail erläutert werden. Die Gliederung des Forschungsberichtes orientiert sich weitgehend an Arbeitsschritten/Modellkomponenten des „Stoffstrommodells Ressourcenschonungspotenzial“.

Ausgehend von vorliegenden demografischen Vorausberechnungen und prognostischen Aussagen zur Gebäudebestandsentwicklung für Wohnen und Gewerbe werden regionalisierte Ausprägungen möglicher Gebäudebestandsentwicklungen modelliert (s. Kapitel 2) Im nächsten Schritt werden Baustoffkennwerte gebildet, um die Gebäudebestandsveränderungen in Input- und Outputströme umzurechnen, die in den Gebäudebestand neu eingebracht werden bzw. diesen wieder verlassen (s. Kapitel 3). Diese Bauabfallströme werden in Ströme möglicher Recycling-Gesteinskörnungen (RC-GK) umgerechnet. Die hierbei erreichbaren Quoten werden durch die technischen Möglichkeiten der Baustoffaufbereitung sowie des gültigen Vorschriftenwerkes, das den Einsatz von RC-Material bei der Betonherstellung regelt, eingegrenzt. Die Grundlagen hierfür werden in Kapitel 4 geschaffen. Gegenstand des Kapitels 4 ist auch die Darstellung des Standes der Technik, Ergebnisse aus Telefoninterviewbefragungen sowie die Auswertung der Diskussion eines hierzu im Rahmen des Projektes durchgeführten Expertenworkshops.

Durch die Bilanzierung des aus dem Bauabfallstrom resultierenden potenziellen RC-Angebotes mit der aus der Baustoffnachfrage resultierenden potenziellen nachgefragten Nutzmenge an RC-GK werden Einsatzmengen an RC-GK im Hochbau geschätzt. Die dadurch vermeidbare Einsatzmenge an natürlichen GK bei der Betonherstellung wird als RESPOT bezeichnet. Die Modellannahmen für diese Berechnungen sind in Abschnitt 5 zusammengefasst, die Berechnung selbst erfolgt in Kapitel 6.

Aus der Interpretation der Ergebnisse dieser Modellbetrachtungen werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, die eine Ausschöpfung vorhandener Ressourcenschonungspotenziale durch hochwertiges Recycling unterstützen helfen. Dieses Kapitel schließt auch die Empfehlungen des Abschluss-Expertenworkshops mit ein (Kapitel 7).

Um den Hauptbericht nicht zu überfrachten, und damit den Verfahrens- und Gedankenablauf zu unterbrechen, ist diesem ein Anlagenband beigefügt. Dieser umfasst ergänzende Angaben zu den getroffenen Annahmegerüsten sowie den berechneten Ergebnissen, eine Dokumentation der Aufbereitung der Gebäudebestandsdaten zum Ausgangszeitpunkt der Modellierung sowie Ausführungen zum Thema Kupfer in Form eines Exkurses.

1.3 Stoffstrommodell „Ressourcenschonungspotenzial“ – die Modellkomponenten im Überblick

Das Stoffstrommodell „Ressourcenschonungspotenzial“ setzt sich aus Modellkomponenten zusammen, innerhalb derer die relevanten Stoffstromgrößen berechnet werden. Die Komponenten bestehen ihrerseits aus Teilmodellen, die zur Erfüllung der jeweiligen spezifischen Teilfragestellung ausgelegt sind. Die Verknüpfung der Komponenten und damit der Teilmo-

delle erfolgt durch definierte Übergabegrößen. Abbildung 1-1 zeigt den Aufbau des Stoffstrommodells mit den Einzelkomponenten und den Übergabegrößen im Überblick.

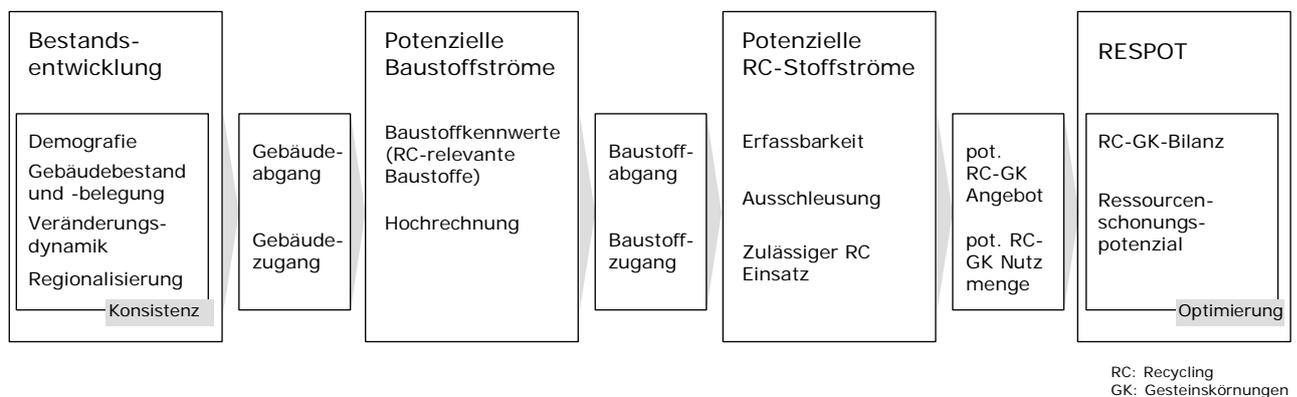


Abbildung 1-1: Grundstruktur des Stoffstrommodells „Ressourcenschonungspotenzial“

Das Modell konstituiert sich aus den Modellkomponenten „Bestandsentwicklung“, „Potenzielle Baustoffströme“, „Potenzielle RC-Stoffströme“ sowie „RESPOT“. Die Verknüpfung dieser Komponenten erfolgt durch die in der Darstellung aufgeführten Stoffstromgrößen „Gebäudezu- bzw. -abgang“, „Baustoffzu- bzw. -abgang“ und „potenzielle(s) RC-GK Angebot bzw. Nutzmenge“. Auf Funktion und Grundaufbau der Einzelkomponenten wird im Folgenden näher eingegangen.

1.3.1 Modellkomponente „Bestandsentwicklung“

Die Modellkomponente „Bestandsentwicklung“ hat die Abbildung möglicher Veränderungen des Gebäudebestandes zum Gegenstand. Ziel dieses Modellierungsschrittes sind prognostische Aussagen zu Zugängen und Abgängen in und aus dem Gebäudebestand unter Berücksichtigung regionaler Unterschiede. Aussagen werden für Veränderungen im Wohngebäudebestand sowie für den Bereich Gewerbe getroffen. Die Regionalisierung erfolgt auf der Ebene von Raumtypen. Raumtypen werden aus Landkreisen mit ähnlicher Ausgangslage und ähnlicher Entwicklungsdynamik gebildet. Die Studie nutzt hierzu die vorliegende Raumtypisierung der aktuellen Raumordnungsprognose des BBR (BBR 2009) (siehe hierzu Ausführungen in Abschnitt 2.1).

Für den Bereich Wohnen wird ein Modell entwickelt, mit Hilfe dessen konsistente Bilder der Gebäudebestandsveränderungen entworfen werden können, unter Beachtung denkbarer Wohnungsnachfrageveränderungen und deren Konsequenzen auf die Belegungssituation im Wohnungsbestand. Ausgehend von vorliegenden Daten zum Gebäudebestand und dessen Belegung werden Parameter der Bestandsentwicklung und der Wohnungsnachfrageentwicklung formal verknüpft und in ein Rechenmodell transformiert, das Aussagen auf der Analyseebene von Raumtypen erlaubt. Die Parameter sind so formuliert, dass ein Bezug zu amtlichen Daten unterschiedlicher Quellen der amtlichen Statistik und zu vorliegenden amtlichen Vorausberechnungen hergestellt werden kann. Auf dieser Grundlage werden Annahmen zu den Parameterausprägungen auf der geforderten Ebene der Raumtypen getroffen und diese unter Beachtung des Gesamtzusammenhangs auf Konsistenz und Plausibilität geprüft.

Für den Bereich Gewerbe liegen keine Untersuchungen und Daten vor, die vergleichbare Aussagen über den vorliegenden Gebäudebestand und dessen Nutzung zulassen. Somit ist hier ein vom Bereich Wohnen abweichendes Vorgehen gefordert. Hier werden spezifische Kennwerte gebildet, die eine Modellierung von Gebäudezu- und -abgängen, bezogen auf demografische Merkmale, erlauben. Dies erfolgt auf Grundlage einer Ex-Post-Analyse von Zu- und -abgängen aus dem Bauwerksbestand von Nichtwohngebäuden, die im Rahmen der Bautätigkeitsstatistik ausgewiesen werden, und deren Verschneidungen mit Bevölkerungsdaten. Der Raumtypenbezug wird hier durch die entsprechende Differenzierung der Bevölkerungsdaten hergestellt, die für Hochrechnungen von Gebäudezu- und -abgängen herangezogen werden.

Die angesprochenen Teilmodelle zur Abbildung der Bestandsentwicklungsdynamik in den Bereichen Wohnen und Gewerbe sind in Kapitel 2 beschrieben.

1.3.2 Modellkomponente „Potenzielle Baustoffströme“

In der Komponente „Potenzielle Baustoffströme“ werden die Grundlagen zur Transformation der Gebäude- und Wohnungszu- und -abgänge in Baustoffmassenströme geschaffen. Zielgrößen dieser Modellierung sind der Baustoffabgang sowie der Baustoffzugang in den und aus dem Gebäudebestand, der durch die Bestandsveränderungen induziert wird. Die vorzunehmende Transformation basiert auf gebäudetypologischen Kennwerten, die Auskunft über die Baustoffzusammensetzung typisierter Gebäudevertreter im Wohn- und Nichtwohnbereich geben. Die Berechnung der Stoffströme erfolgt im Rahmen von Hochrechnungen, indem die Gebäude- und Wohnungszu- und -abgänge mit den gebäudetypologischen Baustoffkennwerten multipliziert werden (Abbildung 1-2).

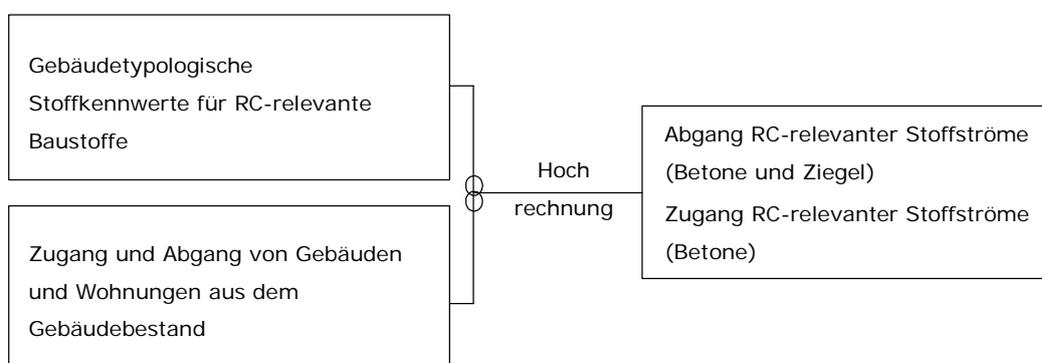


Abbildung 1-2: Transformation von Gebäudebestandsveränderungen in Baustoffströme

Die Aussagen zu recyclingrelevanten Stoffströmen fokussieren im Sinne der Kernfrage dieser Studie auf „hochwertiges Recycling“ und damit in erster Linie auf den Einsatz von RC-Zuschlagsstoffen in Betonen, der im Hochbau zum Einsatz kommt. „Recyclingrelevant“ sind damit Betone und Ziegel des Baustoffabgangs, da hieraus RC-Gesteinskörnungen hergestellt werden können, die als RC-Zuschlag in Betone zulässig sind, sowie Betone des Baustoffzugangs, da diese RC-Material aufnehmen können.

1.3.3 Modellkomponente „Potenzielle RC-Stoffströme“

Die Modellkomponente „Potenzielle RC-Stoffströme“ hat die Transformation der Baumassenstoffströme in RC-Stoffströme zum Gegenstand. Ziel ist die Berechnung potenzieller Mengen an RC-Gesteinskörnungen, die aus den abgehenden Bauabfallstoffströmen durch entsprechende Aufbereitung gewonnen werden können, sowie potenzieller Nutzmengen an RC-Gesteinskörnungen, die in den im Hochbau nachgefragten Beton unter derzeitigen Norm- und Regelbedingungen eingebracht werden können. Ersteres wird im Folgenden als potenzielles RC-GK-Angebot bezeichnet, letzteres als potenzielle RC-GK-Nutzmenge.

Zur Berechnung des potenziellen RC-GK-Angebotes aus den abgehenden Baumassenströmen sind Annahmen zur möglichst sortenreinen Erfassbarkeit der recyclingrelevanten Fraktionen der Betone und Ziegel zu treffen. Weiter sind Annahmen zur Ausschleusung nicht als Betonzuschlag verwendbarer RC-GK zu treffen. Dies erfolgt auf Grundlage einer Reflexion der Möglichkeiten und Grenzen vorhandener Abbruchtechnologien sowie verfügbarer Aufbereitungstechnik. Dabei sind die technischen Obergrenzen der Machbarkeit von Interesse, die die Leitplanken zur Berechnung des potenziellen RC-GK-Angebotes vorgeben.

Die Berechnung der potenziellen RC-GK-Nutzmenge erfolgt unter Beachtung der derzeit zulässigen Mengen an RC-Zuschlagsstoffen in Betonen. Welche Anteile hierbei zulässig sind, ist abhängig vom Liefertyp für rezyklierte Gesteinskörnungen (s. Kapitel 4). Im Rechenmodell werden unterschiedliche Liefertypen betrachtet, die sich hinsichtlich zulässiger Zusammensetzung aus Beton- bzw. Ziegelrezyklat sowie hinsichtlich der zulässigen Anteile an RC-Gesteinskörnungen im Beton unterscheiden. Abhängig vom anzusetzenden Liefertyp ergeben sich demnach unterschiedliche Mengen an potenziellen RC-GK-Nutzmengen der Fraktionen Betonrezyklat und Ziegelrezyklat. Nachfolgende Abbildung zeigt die Modellzusammenhänge dieser Modellkomponente im Überblick.

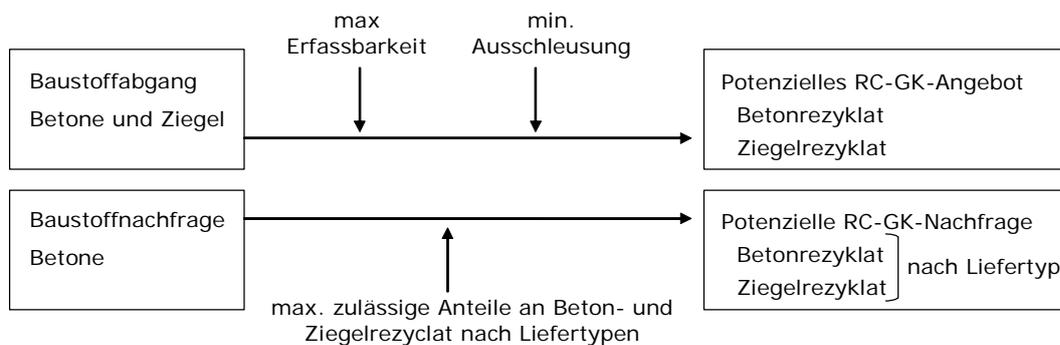


Abbildung 1-3: Transformation von Baustoffströmen in Rezyklat-Ströme

1.3.4 Modellkomponente „RESPOT“

In der Modellkomponente „RESPOT“ erfolgt die raumtypenbezogene Bilanzierung der Potenziale von RC-GK-Angebot und RC-GK-Nutzmenge. Ziel ist die Ermittlung der unter gegebenen Angebots- und Nachfragebedingungen einsetzbaren Menge an RC-Gesteinskörnungen, in Abhängigkeit der regionalen Angebots- und Nachfragesituation. Durch Bilanzierung dieser Größen wird das durch hochwertiges Recycling unter gegebenen Bestandsveränderungen (Zugang und Abgang) erreichbare RESPOT berechnet. Als Refe-

renzwert, vor dessen Hintergrund das RESPOT gespiegelt werden kann, wird das maximal erreichbare Substitutionspotenzial natürlicher Gesteinskörnungen der Betonnachfrage des Zubaus berechnet.

Die in der Modellkomponente RESPOT vorgenommene Optimierung zielt auf die Maximierung des erreichbaren RESPOT ab. Unter Beachtung der berechneten Bilanzen aus RC-GK-Angebot und RC-GK-Nutzmenge werden Festlegungen zum Liefertyp regionsspezifisch angepasst. Liefertypen unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der zulässigen Anteile an Beton-RC-GK und Ziegel-RC-GK sowie hinsichtlich der zulässigen maximalen Substitutionsmengen natürlicher GK. Durch Variation der Liefertypen wird Einfluss auf die Höhe des RC-Angebotes (dadurch, dass unterschiedliche Anteile an Betonen und Ziegel zulässig sind) und auf die Höhe der potenziellen RC-Nutzmenge (dadurch, dass sich die Liefertypen hinsichtlich der zulässigen Beimischungsmengen an RC-GK unterscheiden) genommen. Abhängig von der jeweils vorherrschenden Angebots-Nachfragekonstellation in den Raumtypen wird jeweils der Liefertyp gewählt, aus dem das höchste Ressourcenschonungspotenzial resultiert. Weitere Optimierungsbetrachtungen können durch Variation der Modellannahmen der Erfassung und Aufbereitung vorgenommen werden.

Neben der Berechnung des RESPOTs werden Überschüsse und Mangel an RC-GK innerhalb der Raumtypen berechnet. Ein Überschuss entsteht, wenn die Menge des potenziellen RC-GK-Angebotes die potenzielle Nachfragemenge an RC-GK übersteigt. In diesem Falle entstehen RC-GK-Lager, die nicht im Hochbau nachgefragt werden. Ein Mangel entsteht bei umgekehrten Verhältnissen, wenn die potenzielle RC-GK-Nachfragemenge die verfügbare Menge übersteigt (ausführlich s. Kapitel 6).

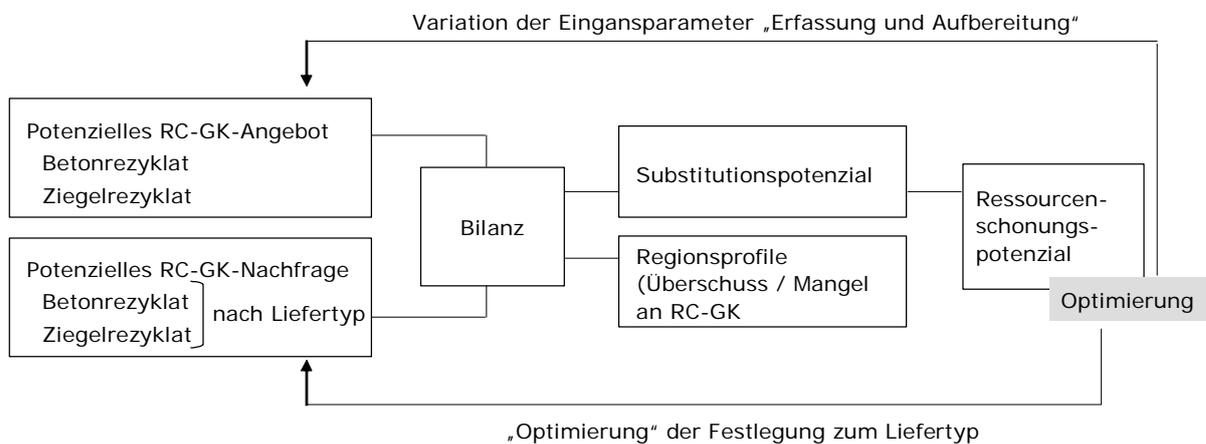


Abbildung 1-4: Bilanzierung von Angebot und Nachfrage an RC-GK zur Berechnung des Ressourcenschonungspotenzials

2 Bestandsentwicklungsmodell

2.1 Raumbezug als Grundlage der Regionalisierung

Wie einleitend bereits aufgeführt, unterliegen Kreisläufe der mineralischen Recyclingwirtschaft in der Regel regionalen Begrenzungen, gleichzeitig differenzieren sich die demografische Entwicklungsdynamik sowie die Bestandsentwicklungsdynamik regional sehr unterschiedlich aus. Dies stellt die lokale Recyclingwirtschaft vor sehr unterschiedlichen Herausforderungen. Bei mittleren Entfernungsradien des Bauabfalltransports mineralischer Fraktion von unter 25 km¹⁴ liegt die geeignete Raummaßstabsebene zur Abgrenzung zusammenhängender Recyclingräume im Übergangsbereich zwischen Gemeinden und Landkreisen. In Deutschland liegt die Zahl der Gemeinden derzeit bei ca. 12.120, die Zahl der Landkreise einschließlich der kreisfreien Städte bei knapp 440. In dieser Kleinteiligkeit Annahmen hinsichtlich möglicher Ausprägungen der Bestandsentwicklungsdynamik zu treffen, ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich. Deshalb werden nachfolgend Wirkungen regional differenzierter Entwicklungsdynamiken auf der Ebene von Raumtypen diskutiert, die Landkreise mit ähnlichem Entwicklungsprofil repräsentieren.

Hierzu wurde zunächst erwogen, die vorliegende Gliederungssystematik des BBR zur Unterscheidung siedlungsstruktureller Kreistypen als Raumtypisierungsansatz zu nutzen. In diesem Typisierungsansatz werden die Kreise und kreisfreien Städten zu neun Typen zusammengefasst. Maßgeblich dabei sind insbesondere die Siedlungsdichte, die Bevölkerungszahl sowie der regionale Kontext¹⁵. Die demografische Entwicklungsdynamik findet dabei keine Berücksichtigung (BBR 2004a:3f.).

Um die Eignung dieser Systematik zur Herstellung des Raumbezugs zur typenbasierten Regionalisierung zu prüfen, wurde die in BBR 2005b erwartete Bevölkerungsdynamik der Landkreise und kreisfreien Städte bis zum Jahr 2020 ermittelt und in die vorliegende Systematik der siedlungsstrukturellen Kreistypen eingeordnet. Das Ergebnis dieser Betrachtung zeigt Abbildung 2-1. Dargestellt sind die 9 von der BBR unterschiedenen siedlungsstrukturellen Kreistypen in der Differenzierung nach Ost- und Westdeutschland. Auf der Ordinate ist die Veränderung der Bevölkerungszahlen in den Kreisen im Zeitraum zwischen 2005 und 2020 aufgetragen. Die Größe der in der Abbildung dargestellten Kreisflächen steht für die Anzahl der Kreise (zusätzlich ist diese Anzahl als Wert angegeben), die den gebildeten Klassen der Bevölkerungsdynamik zugeordnet sind. Es wird deutlich, dass sich in der Typisierung der Kreise entlang der siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBR unterschiedliche Ausprägungen der demografischen Entwicklungsdynamik nicht widerspiegeln. Zwar zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Ost und West, innerhalb dieser Gruppen unterscheiden sich die Profile der Kreistypen aber wenig. Dennoch lassen sich einige Tendenzen ablesen. Beispielsweise weisen die Kernstädte (Kreistypen 1 und 5) in Westdeutschland

¹⁴ Die über stichpunktartige Preisrecherchen ermittelten momentan üblichen Marktpreisunterschiede zwischen rezykliertem Betonsplitt und vergleichbarem Naturmaterial in einer gemittelten Größenordnung von 5 Euro/t indizieren einen wirtschaftlichen Transportradius für RC-Material von etwa 20 km (Weil 2009). Müller (1998) geht in diesem Zusammenhang von 25 km aus.

¹⁵ Lage im siedlungsstrukturellen Regionsgrundtyp (Agglomerationsräume, Verstädterte Räume, Ländliche Räume) (s. BBR 2004a:3f.)

überwiegend negative Entwicklungstrends auf, obgleich sich auch hier wachsende Städte finden lassen. Zusammenfassend ist aber festzuhalten, dass dieser Typisierungsansatz das hier anstehende Anliegen der Unterscheidung von Gebietsgruppen mit deutlich abweichendem Entwicklungsprofil nicht erfüllt.

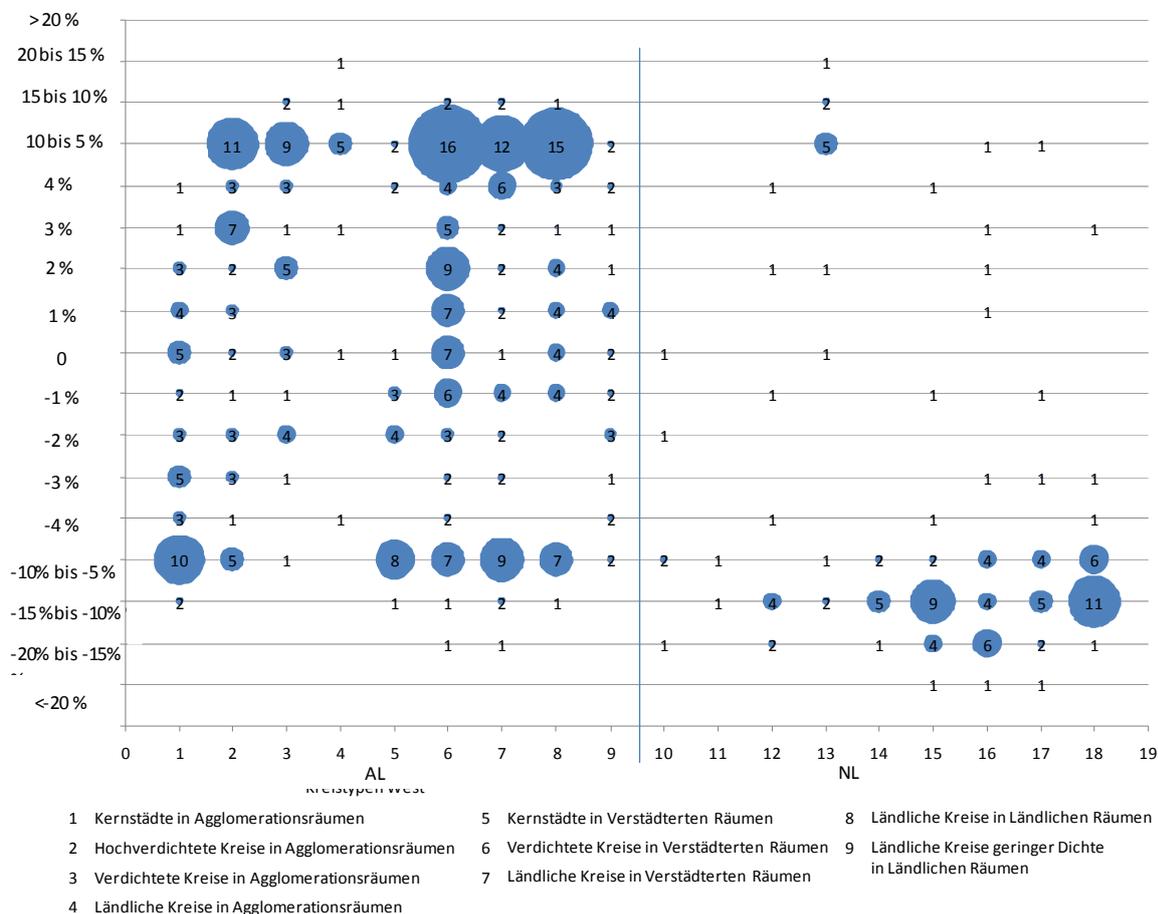


Abbildung 2-1: Verteilung der Kreise in den siedlungsstrukturellen Kreistypen des BBR auf gebildete Klassen der Bevölkerungsdynamik, bezogen auf den Zeitraum 2005 bis 2020 (eigene Berechnungen auf Grundlage von BBR 2005b)

Das in Abbildung 2-1 ersichtliche Bild der Verteilung der siedlungsstrukturell unterschiedlich geprägten Kreise und Städte auf die Klassen der Bevölkerungsdynamik legt nahe, nach einer Typisierung zu suchen, die quer zu den vorliegenden siedlungsstrukturellen Kreistypen liegt. Aufgrund des offensichtlichen, nahezu durchgehenden Unterschieds zwischen den west- und ostdeutschen Kreisen ist es sinnvoll, diese Unterscheidung als erstes Kriterium zu berücksichtigen. Auch sollte angestrebt werden, siedlungsstrukturelle Unterschiede zu berücksichtigen. Hintergrund ist hier weniger die Unterscheidung nach Entwicklungsdynamik insgesamt, sondern - in Vorausschau auf die erforderliche Abbildung denkbarer Bestandsentwicklungen - mögliche qualitative Unterschiede im Wohnungsbestand sowie der Wohnungsnachfrage. Diese qualitativen Unterschiede können auf der hier erfolgten Abstraktionsebene mit der Unterscheidung zwischen städtischen und ländlichen Siedlungseinheiten Berücksichtigung finden, innerhalb derer sich die Anteile an Ein- und Zweifamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern im Siedlungsbestand und der Bestandsentwicklung in der Regel

deutlich unterscheiden. Zentrales Kriterium der Clusterung der Kreise sollte aber die im Vordergrund stehende Entwicklungsdynamik der Kreise sein.

Während der Laufzeit des Vorhabens veröffentlichte das BBR die Überarbeitung der Raumordnungsprognose und legt hier eine Clusterung der Kreise vor, die die oben genannten Kriterien erfüllt (BBR 2009). Der Raumbezug im Rahmen dieses Vorhabens baut deshalb auf dieser Systematik auf, die nachfolgend beschrieben ist.

Unterschieden werden „Gruppen“ unterschiedlicher Demografieprofile. Diese reflektieren darüber hinaus siedlungsstrukturelle Ausprägungen. Im Vordergrund der hierbei vorgenommenen Clusteranalyse stehen verschiedene Merkmale des demografischen Wandels¹⁶. Räumliche Analyseebene ist die Ebene der Kreise und kreisfreien Städte. Unterschieden werden sechs Regionsgruppen, denen die Kreise der Bundesrepublik zugeordnet sind. Jede Gruppe stellt einen Typ mit spezifischen Ausprägungen des demografischen Wandels dar, wobei auf fließende Übergänge zwischen den gebildeten Typen hingewiesen wird. Tabelle 2-1 fasst die gebildeten Regionsgruppen zusammen.

Tabelle 2-1: Regionsgruppen mit unterschiedlichen Profilen des demografischen Wandels (verändert nach BBR 2009: 11)

	Raumtyp	Anzahl Kreise	Jahr des Bevölkerungsmaximums 1990-2050	Dynamik 1990 – 2005 in %	Dynamik 2005 – 2025 in %
1	Vorwiegend Kernstädte der alten Länder	73	2015	1,0	-1,9
2	Ländliche Kreise mit geringer Dynamik in den alten Ländern	115	2001	3,9	-5,5
3	Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik in den alten Ländern	140	2041	13,4	5,3
4	Vorwiegend Kernstädte der neuen Länder	16	1991	-14,8	-15,5
5	Dünn besiedelte, ländliche und häufig periphere Räume in den neuen Ländern	87	1992	-11,6	-19,0
6	Umlandkreise von Berlin und Kernstädten der neuen Länder mit Suburbanisierungstendenzen	9	2028	15,6	5,6

Es werden jeweils drei Gruppen für das Gebiet Westdeutschlands (alte Länder) und Ostdeutschlands (neue Länder) gebildet. In Westdeutschland finden sich in Gruppe 1 überwiegend Kernstädte, die bis 2020 noch einen moderaten Bevölkerungszuwachs zu erwarten haben¹⁷. Das Bevölkerungsmaximum wird hier 2015 erreicht, danach wird dieser Typ langfristig mit Schrumpfung konfrontiert sein. In die Gruppe der ländlichen Kreise mit geringer Dynamik Westdeutschlands fallen Kreise, die im Mittel die maximale Bevölkerungszahl bereits überschritten haben, und die mittel- und langfristig mit Bevölkerungsrückgang konfrontiert sein werden. Verglichen mit der Schrumpfungsdynamik in ländlichen Kreisen Ost-

¹⁶ Beachtung finden die Merkmale Bevölkerungsdynamik 1990 bis 2005, Bevölkerungsdynamik 2005 bis 2025, Jahr des Wechsels zwischen Wachstum und Schrumpfung zwischen 1990 und 2050, Altersstruktur der Gegenwart, Dynamik der Alterung 2005 bis 2025, Dynamik der Hochbetagten und der Schulpflichtigen 2005 bis 2025, Natürlicher Beitrag und Wanderungsbeitrag zur Dynamik 2005 bis 2025, Ausländeranteil 2005.

¹⁷ Hierunter wird auch Berlin gezählt. Aus diesem Grunde wird in den nachfolgenden Darstellungen Berlin immer zur Gruppe der Alten Länder bzw. „Westdeutschland“ gezählt.

deutschlands verläuft diese Dynamik hier aber vergleichsweise moderat. Suburbane Kreise der alten Länder (Typ 3) treten aus den gebildeten Raumtypen als die Gruppe hervor, innerhalb derer sowohl mittelfristig und langfristig noch mit einer deutlichen Wachstumsdynamik zu rechnen ist, obgleich sich diese langfristig deutlich abschwächen wird. Der Zenit der maximalen Bevölkerungszahl wird hier 2041 überschritten. Die Kernstädte und ländlichen Kreise der neuen Länder (Typ 4 und 5) sind seit Beginn der 1990er Jahre von massiven Bevölkerungsrückgängen betroffen. Dies setzt sich auch zukünftig fort, wobei die massivsten Verluste in den ländlichen Kreisen zu erwarten sind. In den neuen Ländern bilden die Umlandkreise von Berlin einen eigenen Dynamiktyp. Hier wird bis 2028 ein Anstieg der Bevölkerungszahlen erwartet, bevor das Pendel der Entwicklungsdynamik in den negativen Bereich umschlägt. Nachfolgende Abbildung 2-2 zeigt die Verortung der gebildeten Regionsgruppen als kartografische Darstellung.

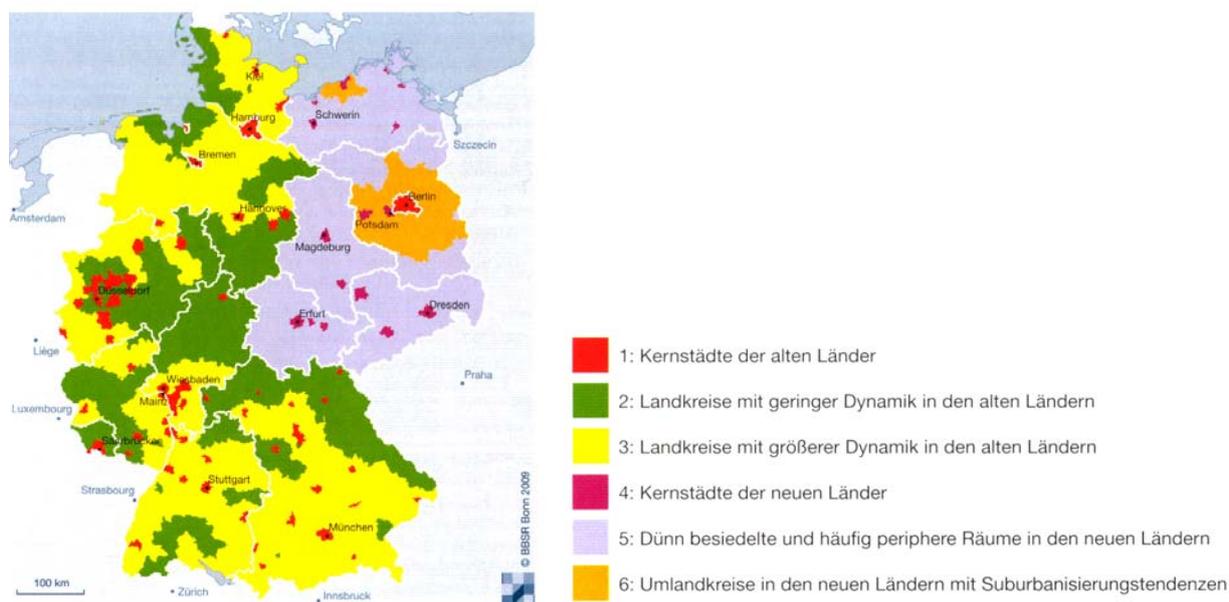


Abbildung 2-2: Räumliche Verortung der verwendeten Demografie-Raumtypen (verändert nach BBR 2009: 12)

2.2 Modell zur Abbildung von Wohnungsbestandsveränderungen auf Raumtypenebene

Mit dem Bestandsentwicklungsmodell sollen prognostische Aussagen zu möglichen Wohnungszu- und -abgängen in und aus dem Bestand unter Berücksichtigung unterschiedlicher regionaler Ausprägungen getroffen werden, um die damit verbundenen Stoffflüsse zu berechnen. Als Regionalisierungsebene dienen in der mittelfristigen Betrachtung bis zum Jahr 2020 die oben beschriebenen Raumtypen¹⁸. Dabei wird auf Aussagen zu möglichen Entwicklungen des Wohnungsbestandes aus vorhandenen Arbeiten aufgebaut, die zum

¹⁸ Für die Langfristperspektive (das Jahr 2050) erfolgt aufgrund fehlender Anhaltspunkte für eine Regionalisierung auf Raumtypenebene die Unterscheidung in Ost und West. Auf dieser Ebene können Annahmen zur Bautätigkeit und zum Abriss aus vorliegenden Studien getroffen werden (s. Abschnitt 5.1.1f.).

Zwecke der Regionalisierung auf die Ebene der Raumtypen projiziert werden¹⁹. Um diese Projektion vorzunehmen, wird ein Konsistenzmodell entwickelt. Dieses beschreibt Größen, mit Hilfe derer sich der Wohnungszugang und Wohnungsabgang einer Raumeinheit aus statistischen Größen berechnen lassen, und fügt diese unter Berücksichtigung der Bezüge zwischen diesen Größen so zusammen, dass sich hieraus in sich konsistente Bilder der Bestandsentwicklung beschreiben lassen. Nachfolgend wird zunächst diskutiert, welche in der amtlichen Wohnungsstatistik angegebenen Größen der Wohnungsbestandsveränderungen in Bezug auf die in diesem Vorhaben vorzunehmenden Stoffstromberechnungen von Relevanz sind. In den darauf folgenden Abschnitten erfolgt dann die Beschreibung des Konsistenzmodells, der verwendeten Größen sowie deren Beziehungen.

2.2.1 Relevante Wohnungsbestandsveränderungen

Die Erfassung von Veränderungen im Wohnungsbestand ist Aufgabe der Bautätigkeitsstatistik. Im Rahmen der amtlichen Bestandsfortschreibung werden jährlich die durch Fertigstellung hinzugekommenen Wohneinheiten zum Gesamtbestand addiert sowie die erfassten physischen Abgänge abgezogen. Die Zugänge berücksichtigen die Fertigstellung neuer Gebäude, Fertigstellungen durch Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden sowie sonstige Zugänge. Abgänge gliedern sich in Abgänge durch Abbruch, Abgänge durch Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden und sonstige Abgänge (Statistisches Bundesamt 2008a:3).

Im Rahmen dieses Vorhabens sind Bestandsveränderungen von Interesse, die signifikant die Höhe abgehender und zugehender Flüsse recyclingrelevanter Baustoffe beeinflussen. Recyclingrelevant im Sinne dieser Studie sind nachgefragte Betone im Gebäudezugang sowie abgehende Beton- und Ziegelfraktionen im durch den Gebäudeabgang induzierten Bauabfallstrom (s. Abschnitt 1.3.2). Die genannten Baustoffe befinden sich größtenteils in der Rohbausubstanz der zu- und abgehenden Gebäude. Damit sind Zu- und -abgänge des Rohbaus der Gebäude relevant, die mit dem Zugang neuer Gebäude sowie dem Totalabgang von Gebäuden statistisch erfasst sind (Abgang durch Abbruch). Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden greifen dagegen deutlich weniger in die Rohbausubstanz der Gebäude ein und verursachen in der Regel keine bedeutenden Stoffströme der genannten Stofffraktionen. Dies gilt insbesondere für Um- und Ausbaumaßnahmen, wo sich die Eingriffe in die Rohbausubstanz auf einzelne Wand- oder Deckenpartien beschränken (Wanddurchbrüche, Versetzen von Wänden u. ä.). Erweiterungs- oder Wiederherstellungsmaßnahmen, die auch unter Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden erfasst werden, können dagegen sehr unterschiedliche Ausmaße annehmen und lassen sich nicht pauschal hinsichtlich ihrer Stoffstromrelevanz einordnen. Es wird aber angenommen, dass diese Maßnahmen quantitativ vergleichsweise wenig ins Gewicht fallen und deren Stoffstromwirkung hinsichtlich der genannten Baustoffe dadurch gering sind. Somit stellen der

- Zubau durch Fertigstellung neuer Gebäude (im Folgenden als Zubau bezeichnet) sowie die
- Abgänge durch Abbruch (im Folgenden als Abgang bezeichnet)

¹⁹ Die Erstellung eigener Regionalprognosen war nicht Gegenstand des Vorhabens.

die relevanten Wohnungsbestandsveränderungen im Sinne der Modellierungsaufgabe dieses Vorhabens dar. Die weiteren genannten Kategorien der Bestandsveränderungen werden dagegen als in diesem Sinne nicht stoffstromrelevant eingestuft. Sie werden als Sammelposition unter „Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden“ gefasst.

2.2.2 Konsistenzmodell

Die Raumordnungsprognose des BBR (ROP) (BBR 2005b) trifft als einzige vorliegende Vorausberechnung regionalisierte Aussagen zur Entwicklung des Wohnungsangebotes für das gesamte Bundesgebiet auf Kreisebene. Es handelt sich hierbei um ein zuwachsorientiertes Prognosemodell. Im Rückgriff auf demografische Parameter berechnet die ROP eine potenzielle Neubaunachfrage. Diese ist die einzige amtlich vorliegende Orientierung zur regionalisierten Einschätzung zukünftiger Zugänge in den Wohnungsbestand. Einflüsse der Angebotsstruktur des vorhandenen Wohnungsbestandes und der Nutzung des Bestandes bleiben in der ROP dabei außer Acht. So werden auch keine Aussagen zu zukünftigen Abgängen und Bestandsveränderungen getroffen. Grund dafür ist die Tatsache, dass die empirischen Grundlagen zur Beschreibung von Abgängen als ungesichert gelten. Während die Fertigstellungen in der Bundesstatistik gut erfasst sind, erfasst die Wohnungsstatistik Abgänge nur unvollständig (Statistisches Bundesamt 2008a:3, BBR 2005b:101, Kühne-Büning et al. 2005). Auch die Datengrundlage zur Beschreibung des Wohnungsleerstandes, die Aussagen zur Intensität der Bestandsnutzung zulässt, gilt als unbefriedigend. Aussagen hierzu beziehen sich meist auf Teilbestände oder räumlich abgegrenzte Gebiete. Aufgrund uneinheitlicher Erhebungsmodi sind der Zusammenführung dieser Daten enge Grenzen gesetzt. Einzig der Mikrozensus hält auf der Ebene von Raumordnungsregionen entsprechende Zahlen flächendeckend für Deutschland vor (BBR 2005b:102f.). Aufeinander abgestimmte prognostische Daten zu - auf Raumtypenebene regionalisierten - Zugängen und Abgängen an Wohnungen in und aus dem Bestand können damit nicht direkt aus vorliegenden Vorausberechnungen übernommen werden.

Auf höher aggregierter Ebene sind jedoch entsprechend abgestimmte Vorausberechnungen der Wohnungsbestandsentwicklung verfügbar. So diskutieren Banse und Effenberger (2006) Auswirkungen des demografischen Wandels auf den Wohnungsbestand Deutschlands in der Unterscheidung alte und neue Bundesländer. Die dabei vorgenommenen Vorausberechnungen zur Wohnungsbestandsentwicklung beruhen auf abgestimmten Annahmen zur Entwicklung des Zugangs und des Abgangs an Wohnungen. Dabei wird das Ausmaß an Wohnungszugängen unter Beachtung der Entwicklung demografischer Einflussgrößen ermittelt. Wohnungsabgänge werden unter Berücksichtigung der Wohnungsnachfrage insgesamt (Neubau und Bestand), der berechneten Wohnungszugänge sowie der hieraus resultierenden Leerstandsentwicklung geschätzt. Für die genannte Differenzierung West-/Ostdeutschland werden instruktive Setzungen für mögliche Leerstandsentwicklungen und zukünftige Wohnungsabgänge vorgenommen, um hieraus im manuellen Abgleich der Parameter plausible Bilder der Bestandsentwicklung und -nutzung zu entwerfen (s. Abschnitt 5.1.1). Die Plausibilität der Bilder stützt sich auf Annahmen zu möglichen Entwicklungskorridoren der Einzelparameter, die von den Bearbeitern aus Beobachtungen jüngster Entwicklungen des Wohnungsangebotes, der Nachfrage und der Nutzung des Wohnungsbestandes getroffen wurden.

Das hier entwickelte Konsistenzmodell greift diesen Gedanken des in sich schlüssigen Abgleichs auf. Die Ermittlung der Ressourcenströme verlangt aber einen höheren Regionalisierungsgrad, so dass nach Wegen gesucht werden musste, diesen Konsistenzabgleich zu formalisieren und in einen Algorithmus zu übersetzen. Dies ist notwendig, da mit steigender Regionalisierung die Zahl der Raumeinheiten steigt, innerhalb derer ein Abgleich vorzunehmen ist und damit der Aufwand der Anpassung, vor allem aber die Begründungen der Annahmen Ausmaße annehmen würden, die ohne Formalisierung nicht mehr nachvollziehbar wären. Die Grundstruktur des entwickelten Konsistenzmodells zeigt Abbildung 2-3 im Überblick.

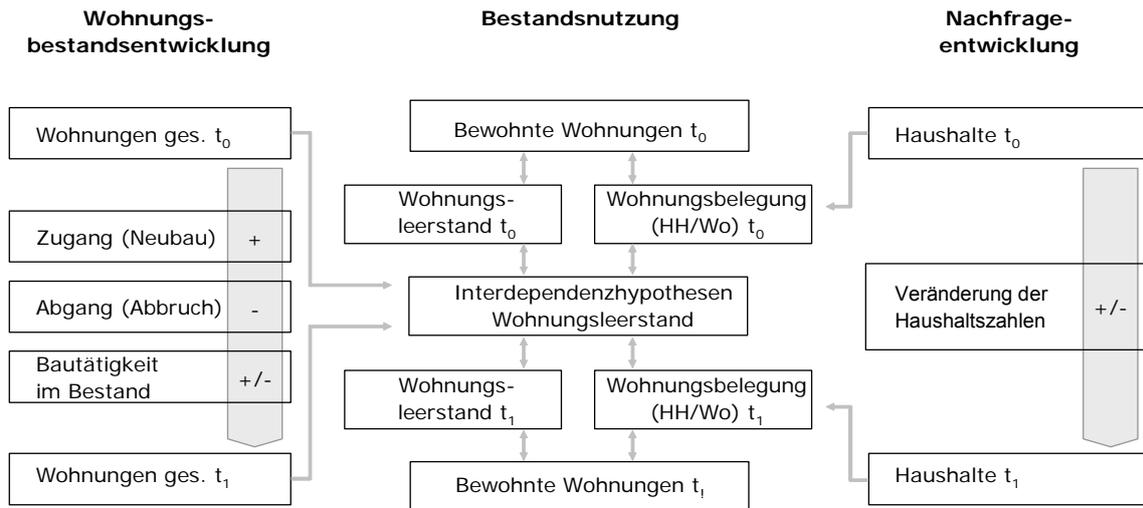


Abbildung 2-3: Struktur des Konsistenzmodells

Das Modell besteht aus drei ineinander greifenden Annahmengerüsten, entlang derer ein abgestimmtes und in sich konsistentes Bild der Entwicklung der Bestandsnutzung auf der Ebene der Raumtypen entworfen werden kann. Der in der Abbildung 2-3 links aufgetragene Strang beschreibt die Merkmale und deren Bezüge, die zusammen das Annahmengerüst der Wohnungsbestandsentwicklung darstellen. Das Annahmengerüst der Nachfrageentwicklung (rechter Strang) fokussiert auf den Bestand an Haushalten und dessen Veränderungen durch Zu- und Abnahme von Haushaltszahlen. Wohnungsbestand und Wohnungsnachfrage wird über das Annahmengerüst der Bestandsnutzung zu einem Gesamtsystem zusammengefügt. Hier erfolgt die Überlagerung von Bestand und Nachfrage, die sich in den Ausprägungen der bewohnten Wohnungen bzw. der Leerstandssituation niederschlägt. Der Kern dieses Teilbereichs basiert auf hypothetisch formulierten Zusammenhängen, die auf den spezifischen Regionskontext bezogene Leerstandsausprägungen und -veränderungen von Teilbeständen annehmen und somit eine formalisierte Schätzung von Leerständen auf Raumtypenebene erlauben. Nachfolgende Abschnitte 2.2.3 bis 2.2.5 spezifizieren die drei genannten Annahmengerüste, die dabei verwendeten Größen sowie deren Bezüge zueinander.

2.2.3 Annahmengerüst zur Abbildung der Wohnungsbestandsentwicklung auf der Ebene von Raumtypen

2.2.3.1 Wohnungsbestand zum Zeitpunkt t_0

Daten zum Gebäude- und Wohnungsbestand werden mit der Bautätigkeitsstatistik jährlich ausgewiesen. Sie sind auf Gemeindeebene abrufbar (s. Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2007). Sachlich erfolgt in den Standardveröffentlichungsprogrammen eine Unterscheidung nach Gebäuden mit einer, mit zwei und mit drei und mehr Wohnungen. Die Angaben beruhen auf Fortschreibungen von Daten zum Wohnungsbestand der letzten Gebäude- und Wohnungszählungen. Die Vollerhebungen erfolgten in Westdeutschland zuletzt im Jahr 1987, in Ostdeutschland im Jahr 1995. Die genannte Fortschreibung berücksichtigt die statistisch erfassten Zu- und -abgänge. Bereits oben wurde auf das Problem der Untererfassung der Abgänge hingewiesen. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass der in der Bautätigkeitsstatistik ausgewiesene fortgeschriebene Wohnungsbestand den tatsächlichen Bestand in der Tendenz überschätzt (s. BBR 2005b: 101). Über das Ausmaß der Überschätzung liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Diese Fehleinschätzung ist bei der Überlagerung von Daten unterschiedlicher statistischer Quellen entsprechend zu berücksichtigen.

Gebäudetypologische Stoffkennwerte, auf die im Rahmen des Stoffstrommodells zurückgegriffen wird, unterscheiden zwischen Ein- und Zweifamilienhäuser und Mehrfamilienhäuser (s. Abschnitt 3.1). Entsprechend erfolgt auch die Modellierung der Wohnungsbestandsentwicklung in dieser Differenzierung²⁰. Tabelle 2-2 zeigt den Wohnungsbestand, wie er sich differenziert nach den gebildeten Raumtypen zum Stand 2005 (t_0) aus der Statistik ergibt.

Tabelle 2-2: Wohnungsbestand in Wohngebäuden²¹ in t_0 (2005) in der verwendeten sachlichen und räumlichen Gliederung (Quelle: Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2007)

Raumtyp			Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH)	Wohnungen in Mehrfamilienhäusern (MFH)
Westdeutschland und Berlin	1	vorwiegend Kernstädte	2.083.483	8.066.152
	2	Ländliche Kreise mit geringer Dynamik	3.633.957	3.224.440
	3	Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik	9.641.521	5.918.313
Ostdeutschland (ohne Berlin)	4	vorwiegend Kernstädte	153.903	1.075.352
	5	dünn besiedelte und häufig periphere Räume	2.172.066	2.843.369
	6	Umlandkreise von Berlin und Kernstädten mit Suburbanisierungstendenzen	403.034	335.613

²⁰ Ein- und Zweifamilienhäuser werden im Folgenden mit EZFH abgekürzt, Mehrfamilienhäuser mit MFH.

²¹ Die Daten beziehen sich auf den Wohnungsbestand in Wohngebäuden. Zu einem geringen Teil (ca. 2 % des Wohnungsbestandes insgesamt, in Westdeutschland 2 %, in Ostdeutschland 1,9 %) befinden sich Wohnungen auch in Nichtwohngebäuden (z. B. Hausmeisterwohnungen). Diese Bausubstanz fällt in den Bereich Gewerbe und ist dort im Rahmen des hier aufgebauten Modells implizit enthalten.

2.2.3.2 Zugang neuer Gebäude

Der in Abbildung 2-3 gekennzeichnete „Zugang“ (Neubau) wird entsprechend der in der Bautätigkeitsstatistik verwendeten Definition von „Fertigstellung neuer Gebäude“ verwendet. Hiervon zu unterscheiden sind „Fertigstellungen durch Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden“ sowie „sonstige Zugänge“ (s. hierzu Abschnitt 2.2.3.4). Sachlich und räumlich wird dieses Merkmal im Konsistenzmodell entsprechend der in Tabelle 2-2 gegebenen Struktur differenziert²².

Die Schätzung der räumlichen Verteilung des Zubaus auf die Raumtypen orientiert sich an der Struktur der Verteilung des in der ROP angegebenen Neubaupotenzials auf die Raumtypen innerhalb West- und Ostdeutschlands. Tabelle 2-3 stellt diese Struktur anhand der prozentualen Aufteilung des in der ROP im Zeitraum 2002 bis 2020 angegebenen Neubaupotenzials auf die Raumtypen dar.

Tabelle 2-3: Modellannahmen zur räumlichen Struktur des Zubaus (2005 bis 2020) auf die Raumtypen in Anlehnung an die Verteilung des Neubaupotenzials der ROP auf die Raumtypen (eigene Berechnungen auf Grundlage von BBR 2005b)

Raumtyp			Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern	Wohnungen in Mehrfamilienhäusern
Westdeutschland und Berlin	1	vorwiegend Kernstädte	18,4 %	38,0 %
	2	Ländliche Kreise mit geringer Dynamik	13,9 %	13,2 %
	3	Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik	67,7 %	48,8 %
	Gesamt		100 %	100 %
Ostdeutschland (ohne Berlin)	4	vorwiegend Kernstädte	10,5 %	44,7 %
	5	dünn besiedelte und häufig periphere Räume	59,8 %	27,4 %
	6	Umlandkreise von Berlin und Kernstädten mit Suburbanisierungstendenzen	29,7 %	27,9 %
	Gesamt		100 %	100 %

2.2.3.3 Abgang durch Abbruch

Unter Abgang durch Abbruch wird entsprechend der in Abschnitt 2.2.1 vorgenommenen Begrifflichkeit der Totalabgang von Gebäuden gefasst. Auf die Schwierigkeiten, Aussagen zum Gebäude- und Wohnungsabgang zu treffen, wurde bereits hingewiesen. Hier besteht das Problem der Untererfassung. Die Rahmenbedingungen der Abrisstätigkeit der jüngsten Stadtentwicklung unterschieden sich deutlich zwischen Ost und West. Während in Ostdeutschland das Abrissgeschehen stark von staatlichen Förderprogrammen geprägt war, verbunden mit einer erhöhten öffentlichen Aufmerksamkeit (Fördermittel bei Meldung von Abriss), verlief es in Westdeutschland in der Regel außerhalb staatlich beeinflusster Strukturen mit vergleichsweise geringer öffentlicher Wahrnehmung. Es ist deshalb nicht auszuschließen, dass sich die Erfassungsfehler der Abgänge zwischen Ost- und Westdeutschland

²² Gleiches gilt für die nachfolgend beschriebenen Merkmale Bautätigkeit im Bestand und Wohnungsbestand zum Zeitpunkt t_1 .

strukturell unterscheiden. Hinweise darauf, dass entsprechende strukturelle Unterschiede auch in der regionalen Differenzierung innerhalb West- und Ostdeutschlands auftreten, liegen nicht vor. Für die Einschätzung der Struktur der Verteilung des statistisch erhobenen Abgangs nach Gebäudeart und Gebäudetyp kann deshalb die Annahme getroffen werden, dass Erfassungsfehler innerhalb der Raumtypen Westdeutschlands sowie innerhalb der Raumtypen Ostdeutschlands ähnlich ausgeprägt sind. Eine „Korrektur“ der Abrisszahlen hätte somit auf die prozentuale Verteilung der Abgangszahlen auf die Raumtypen wenig Auswirkung, da diese in den jeweiligen Raumtypen Ost- bzw. Westdeutschlands mit gleichen Faktoren zu erfolgen hätte. Deshalb wird hier der Weg gewählt, die Verteilung des Abgangs auf die Raumtypen auf Grundlage der Verteilungsstruktur aktuell in der Statistik zu beobachtender Abrisszahlen vorzunehmen.

Die Bautätigkeitsstatistik weist den erfassten jährlichen Totalabgang auf der Ebene von Verwaltungsbezirken aus, die mehrere Landkreise umfassen können. Auf Grundlage dieser Angaben werden mittlere Abrissquoten der jüngsten Entwicklung für die Raumtypen geschätzt. Dies geschieht in drei Schritten. Erst werden mittlere Abrissquoten für die Verwaltungsbezirke berechnet, dann werden diese jeweils für die Kreise innerhalb eines Verwaltungsbezirkes als gleich angenommen, und im dritten Schritt werden aus der Zusammenführung aller Kreise eines bestimmten Raumtyps hieraus raumtypenspezifische Abrisszahlen ermittelt (s. hierzu Tabellen in Anlage 1). Hieraus ergibt sich die in Tabelle 2-4 dargestellte Struktur der räumlichen Verteilung des Totalabgangs auf die Raumtypen, die im Konsistenzmodell über den mittelfristigen Betrachtungszeitraum (bis 2020) fortgeschrieben wird.

Tabelle 2-4: Modellannahmen zur räumlichen Struktur des Abgangs auf die Raumtypen in Anlehnung an Angaben zur Abrisstätigkeit zwischen 2002 bis 2005 auf der Ebene von Verwaltungsbezirken (eigene Berechnungen auf Grundlage von Statistisches Bundesamt 2004-2006)

Raumtyp		Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern	Wohnungen in Mehrfamilienhäusern	
Westdeutschland und Berlin	1	vorwiegend Kernstädte	16,2 %	48,9 %
	2	Ländliche Kreise mit geringer Dynamik	15,4 %	15,9 %
	3	Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik	68,5 %	35,2 %
	Gesamt		100 %	100 %
Ostdeutschland (ohne Berlin)	4	vorwiegend Kernstädte	7,4 %	23,1 %
	5	dünn besiedelte und häufig periphere Räume	84,9 %	69,5 %
	6	Umlandkreise von Berlin und Kernstädten mit Suburbanisierungstendenzen	7,7 %	7,5 %
	Gesamt		100 %	100 %

2.2.3.4 Bautätigkeit im Bestand

„Bautätigkeit im Bestand“ fasst im Rahmen dieser Studie alle Wohnungsbestandsveränderungen zusammen, die in der hier vorgenommenen Betrachtung ohne Relevanz für das

Entstehen von RC-Stoffströmen sind (s. Abschnitt 2.2.1, dort als „Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden“ bezeichnet).

Die Unterscheidung des Gesamtzugangs an Wohnungen in Wohnungszugang durch „Zugang neuer Gebäude“ und Wohnungszugang durch „Bautätigkeit im Bestand“ erfolgt im Konsistenzmodell mit Hilfe pauschal festgelegter Anteile der beiden Positionen am Gesamtzugang, die auf aktuellen Angaben der Bautätigkeitsstatistik beruhen. Dabei wird angenommen, dass sich dieser Anteil im Betrachtungszeitraum nicht signifikant ändert. Dies scheint mit Blick auf entsprechende Zahlen zurückliegender Jahre gerechtfertigt, da sich diese Anteile auch in den vergangenen Jahren vergleichsweise stabil verhielten. Es wird aber zwischen Ost- und Westdeutschland unterschieden, da sich auf dieser Ebene Unterschiede bemerkbar machen. Die Modellannahmen zu den entsprechenden Anteilen beziehen sich auf das Jahr 2005. Hier entstanden in Ostdeutschland 84,8 % des Zugangs im Zuge der Errichtung neuer Gebäude, und 15,2 % im Rahmen der Bautätigkeit im Bestand. In Westdeutschland lag der Anteil des Wohnungszugangs durch Errichtung neuer Gebäude bei 89 % und der Anteil der durch Bautätigkeit im Bestand entstandenen Wohnungen entsprechend bei 11,0 %.

2.2.3.5 Wohnungsbestand zum Zeitpunkt t_1

Der Wohnungsbestand zum Zeitpunkt t_1 resultiert aus dem Wohnungsbestand t_0 sowie den beschriebenen Zu- und -abgängen im Zeitraum zwischen t_0 und t_1 . Die räumliche und sachliche Gliederung der Bestandsbeschreibung in t_1 entspricht der, die der Beschreibung des Ausgangsbestandes in t_0 zugrunde liegt.

2.2.4 Annahmengerüst zur Abbildung der Entwicklung der Gesamtnachfrage nach Wohnungen auf der Ebene von Raumtypen

Die Zahl der Haushalte bestimmt maßgeblich die Ausprägung der Wohnungsnachfrage. Zur weiteren Spezifizierung des Nachfrageverhaltens von Haushalten ziehen vorliegende Prognosemodelle weitere demografische Merkmale heran und stellen Bezüge zwischen deren Ausprägung und dem spezifischen Nachfrageverhalten der Haushalte her. Im Wesentlichen sind dies die Haushaltsgröße und das Alter des Haushaltsvorstandes bzw. der Bezugsperson (z. B. BBR 2005b:71ff., Iwanow, Eichhorn 2002). Im vorliegenden Konsistenzmodell kann auf diese Differenzierung verzichtet werden, da lediglich eine Abschätzung der Gesamtwohnungsnachfrage vorgenommen wird, um diese dem Gesamtwohnungsangebot gegenüber zu stellen (s. Abschnitt 3.3.5). Eine Differenzierung nach unterschiedlichen Angebotsformen erfolgt dabei nicht.

Die angenommene Zahl der Haushalte zum Zeitpunkt t_0 entspricht den Angaben der vorliegenden Raumordnungsprognose (BBR 2009) für das Jahr 2005. Auch die Veränderungen der Haushaltszahlen im mittel- und langfristigen Betrachtungszeitraum werden der Raumordnungsprognose entnommen. Tabelle 2-5 fasst dieses Annahmengerüst zusammen.

Tabelle 2-5: Modellannahmen zur Veränderung der Haushaltszahlen zwischen 2005 bis 2020, bezogen auf 2005 in Anlehnung an die ROP 2009 (eigene Berechnungen unter Nutzung von Daten aus BBR 2009)

Raumtyp			Anzahl HH 2005	Veränderung bis 2020
Westdeutschland und Berlin	1	vorwiegend Kernstädte	10.432.000	5,3 %
	2	Ländliche Kreise mit geringer Dynamik	6.791.300	-0,4 %
	3	Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik	15.866.100	10,1 %
	Gesamt		33.089.400	6,4 %
Ostdeutschland (ohne Berlin)	4	vorwiegend Kernstädte	723.800	-4,6 %
	5	dünn besiedelte und häufig periphere Räume	1.162.900	-9,6 %
	6	Umlandkreise von Berlin und Kernstädten mit Suburbanisierungstendenzen	10.432.000	11,6 %
	Gesamt		6.587.700	-6,4 %

Die Haushalte fragen Wohnungen im gesamten Wohnungsbestand nach. Gegenstand der Betrachtung dieser Modellierung sind jedoch nur Wohnungen in Wohngebäuden. Diese machen ca. 98 % des gesamten Wohnungsbestandes aus (s. Fußnote 21). Um dem betrachteten Wohnungsbestand die rechnerisch adäquate Haushaltszahl gegenüberzustellen, wird der Anteil der Haushalte in Wohngebäuden in der Unterscheidung Ost-/Westdeutschland rechnerisch korrigiert. Dies erfolgt erstens entsprechend geschätzter Anteile bewohnter Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden und zweitens unter Annahmen zum Leerstand in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Leerstandsquoten werden entsprechend der auf aggregierter Ebene im Mikrozensus ausgewiesenen Werte angenommen. Die Annahmen und daraus resultierende Faktoren zur Einschätzung der Anzahl der Haushalte, die Wohnungen in Wohngebäuden nachfragen, sind in Tabelle 2-6 zusammengefasst.

Tabelle 2-6: Schätzparameter zur Ermittlung des Anteils der Haushalte (HH), die Wohnungen in Wohngebäude bewohnen (Leerstandsannahmen basieren auf Statistisches Bundesamt 2008b)

Gebiet	Anteil Wohnungen in Wohngebäuden	Wohnungsleerstand in		Faktor zur Berechnung des Anteils der HH in Wohngebäude
		Wohngebäuden	Nichtwohngebäuden	
Westdeutschland	98,0 %	6,7 %	16,0 %	98,2 %
Ostdeutschland	98,1 %	12,3 %	21,9 %	98,3 %

2.2.5 Annahmengerüst zur Abbildung der Bestandsnutzung auf der Ebene der Raumtypen

2.2.5.1 Interdependenzhypothesen

Die amtliche Statistik macht keine Angaben zu Leerstandsausprägungen, die sich direkt auf die Ebene der Raumtypen übertragen ließen. Um diese Größe in das Konsistenzmodell einzubinden und die Abbildung der Bestandsnutzung zu ermöglichen, wird deshalb ein Ver-

fahren zur Leerstandsschätzung auf Raumtypenebene entwickelt. Wichtiges Anliegen dabei ist, ein möglichst einfaches und klares Annahmengerüst zu entwerfen und den Prozess der Schätzung weitestgehend zu formalisieren. Den Kern des Schätzverfahrens bilden Hypothesen, die die Abhängigkeiten der Leerstandsausprägungen zwischen Ein- und Zwei- und Mehrfamilienhausbestand unter Berücksichtigung spezifischer Regionskontexte beschreiben. Diese Hypothesen werden nachfolgend als „Interdependenzhypothesen“ bezeichnet.

Ausprägungen des Wohnungsleerstandes sind in hohem Maße abhängig von dem sozio-ökonomischen Kontext der Regionen (BBR 2004b:72f). Auch die Höhe und Struktur des vorhandenen Wohnungsbestandes sowie dessen Passfähigkeit zu Nachfragepräferenzen sind vor diesem Hintergrund von Bedeutung. Hieraus entstehen sehr unterschiedliche Angebots-/Nachfragekonstellationen. Die Spannbreite möglicher Ausprägungen erstreckt sich zwischen zwei Extremen, die vereinfacht wie folgt beschrieben werden können: In „angespannten Wohnungsmärkten mit hohem Nachfragedruck“ wird im Extremfall nahezu der gesamte Wohnungsbestand belegt sein. Ein Mindestleerstand wird aber dennoch immer auftreten. Dies ist insbesondere auf Umzugs-/Sanierungstätigkeiten zurückzuführen, infolge derer Wohnungen über eine begrenzte Zeit leer stehen. Dieser „natürliche Leerstand“ wird in der Regel mit 2 - 3 % angenommen (BBR 2004b:70). In „stark entspannten Wohnungsmärkten“ entstehen dagegen große Angebotsüberhänge im Wohnungsbestand. Kleinräumig können dabei sehr hohe Leerstandquoten entstehen. Diese erreichen auf Gemeindeebene Größenordnungen von über 20 % (BBR 2004b:72f.), teilräumig kann dies darüber liegen. Bei geringer Nachfrage wird angenommen, dass Leerstände in nahezu allen Teilbeständen steigen, allerdings auf unterschiedlichem Niveau. So liegt in Westdeutschland, das insgesamt eine angespanntere Wohnungsmarktsituation aufweist als Ostdeutschland, der Wohnungsleerstand unter dem Leerstandsniveau, das sich in Ostdeutschland abzeichnet. Dies gilt auch für Leerstände in den jeweiligen Teilbeständen EZFH und MFH. In beiden Fällen liegt der EZFH-Leerstand jedoch unter dem MFH-Leerstand, wobei diese Unterschiede in Ostdeutschland deutlicher ausgeprägt sind (Tabelle 2-7).

Tabelle 2-7: Aktuelle Ausprägungen des Wohnungsleerstandes in West- und Ostdeutschland nach EZFH und MFH (Quelle: Mikrozensus-Zusatzerhebung - Statistisches Bundesamt 2008b)

	EZFH	MFH	Gesamt
Westdeutschland	5,8 %	7,6 %	12,3 %
Ostdeutschland	7,0 %	14,9 %	6,7 %

Bezug nehmend auf diese Zusammenhänge wird in den Interdependenzhypothesen die Annahme formuliert, dass sich Wohnungsleerstände, die in den Teilbeständen EZFH und MFH bestehen, bei Veränderungen der „Anspannung“ auf dem Wohnungsmarkt gleichgerichtet verändern und in einem wechselseitigen Abhängigkeitsverhältnis stehen. Dabei bewegt sich der Leerstand im MFH-Bestand in einem deutlich breiteren Spektrum als der Leerstand im EZFH-Bestand. Weiter wird angenommen, dass das Ausmaß dieser Abhängigkeit insbesondere auch von der Struktur des Wohnungsbestandes insgesamt bestimmt wird. Ist der Anteil an EZFH gering, so wird angenommen, dass sich eine ändernde Nachfrage weniger stark auf den EZFH-Bestand auswirkt als bei hohem EZFH-Anteil. Bei geringem EZFH-

Anteil besteht aufgrund der größeren Knappheit des Angebotes ein deutlich höherer Nachfragedruck im EZFH-Teilmarkt, Nachfrageänderungen wirken sich deshalb tendenziell stärker auf den - in Relation dazu entspannteren - MFH-Teilmarkt aus. Bei hohem EZFH-Anteil verringert sich die Knappheit auf diesem Teilmarkt, so dass Nachfrageveränderungen hier stärker ins Gewicht fallen.

In Westdeutschland liegt der EZFH-Anteil mit 47,2 % deutlich über dem im ostdeutschen Wohnungsbestand. Deutliche Unterschiede zeigen sich auch zwischen städtisch und ländlich geprägten Regionen (Tabelle 2-8).

Tabelle 2-8: Struktur des Wohnungsangebotes, dargestellt am Anteil von Wohnungen in EZFH am Gesamtwohnungsbestand 2005 in Wohngebäuden (eigene Berechnungen auf Grundlage von Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2007)

Raumtyp			Anteil EZFH
Westdeutschland und Berlin	1	vorwiegend Kernstädte	20,5 %
	2	Ländliche Kreise mit geringer Dynamik	53,0 %
	3	Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik	62,0 %
	Gesamt		47,2 %
Ostdeutschland (ohne Berlin)	4	vorwiegend Kernstädte	12,5 %
	5	dünn besiedelte und häufig periphere Räume	43,3 %
	6	Umlandkreise von Berlin und Kernstädten mit Suburbanisierungstendenzen	54,6 %
	Gesamt		39,1 %

Zur Operationalisierung der Interdependenzhypothesen werden für die betrachteten Raumtypen jeweils spezifische Ausprägungen der wechselseitigen Abhängigkeiten von Leerstandsausprägungen im EZFH- und MFH-Wohnungsbestand formuliert. Dabei beschränken sich die zu treffenden Annahmen auf die Festlegung minimaler Leerstände bei sehr hohem Nachfragedruck und hoher Leerstandsquoten bei hohem Angebotsüberhang. Bewegt sich der Nachfragedruck zwischen diesen Extremausprägungen, werden für Leerstandsquoten im MFH-Bestand und EFH-Bestand festgelegte Wertepaare berechnet, die sich bei der jeweiligen Ausprägung des Nachfragedrucks in den beiden Teilbeständen einstellen. Am Beispiel der für Raumtyp 1 operationalisierten Leerstandshypothese, die in Abbildung 2-4 dargestellt ist, soll dieses Vorgehen verdeutlicht werden.

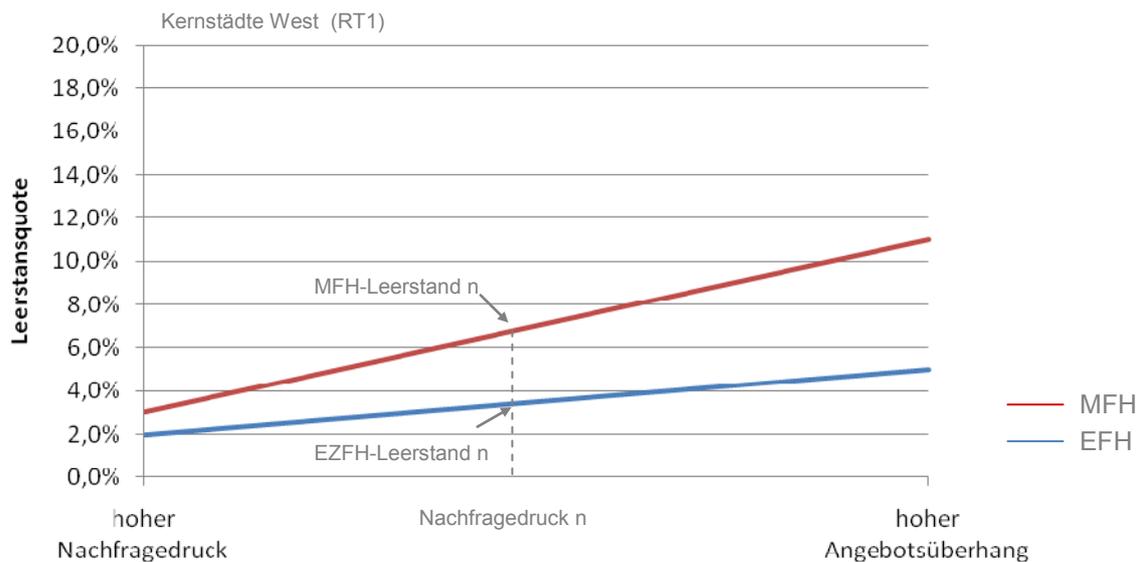


Abbildung 2-4: Operationalisierung der Interdependenzhypothese, dargestellt am Beispiel von Raumtyp 1

Bei hohem Nachfragedruck („Vollbelegung“) wird als „Umzugsreserve“ ein Leerstand von 2 % im EZFH-Bestand und 3 % im MFH-Bestand angenommen. Die beiden Werte gelten in der Literatur als übliche, „natürliche“ Leerstände. Für EZFH werden geringere Werte angenommen, da aufgrund des höheren Eigentümeranteils der Bewohner von einer geringeren Umzugshäufigkeit ausgegangen wird. Für das in Abbildung 2-4 dargestellte Beispiel des Raumtyps 1 liegen die Annahmen für hohe Leerstände bei 11 % im MFH-Bestand und 5 % im EZFH-Bestand (s. Tabelle 2-9). In der Realität werden sich in der Regel Wohnungsmarktsituationen einstellen, die zwischen den genannten Extremausprägungen liegen. In diesen Fällen werden entsprechende Leerstandsquoten, die sich bei entsprechendem Nachfragedruck ergeben, entlang der Linienfunktion herausgegriffen. Ergibt sich beispielsweise ein „Nachfragedruck n“, resultiert daraus das Leerstandspaar MFHn/EFHn. Welches Wertepaar konkret anzusetzen ist, wird im Rahmen einer Grenzwertbetrachtung berechnet, die im Rahmen des Abgleichs von Wohnungsbestand und Wohnungsnachfrage angestellt wird (s. hierzu Abschnitt 2.2.5.2).

Die Leerstandsannahmen bei „Vollbelegung“ werden für alle Raumtypen mit 2 % bzw. 3 % identisch getroffen. Die Leerstandsannahmen bei geringem Nachfragedruck unterscheiden sich hingegen raumtypenspezifisch. Den getroffenen Setzungen liegen folgende Annahmen zugrunde: In den Raumtypen Ostdeutschlands liegen denkbare Leerstandsextremausprägungen deutlich über den in Westdeutschland erreichbaren Werten. Dies hat seine Ursachen in der zurückliegenden und zu erwartenden Bevölkerungsdynamik sowie in der zum Teil stark ausgeprägten mangelnden Passfähigkeit zwischen Angebot und Nachfrage, insbesondere im Teilmarkt MFH. In Raumtypen mit überwiegend städtisch geprägter Siedlungsstruktur (RT 1 und RT 4) erreichen die maximalen Leerstandsausprägungen im EZFH-Bestand geringere Werte als in RT mit überwiegend ländlich geprägter Siedlungsstruktur. Grund hierfür sind höhere Knappheiten im EZFH-Bestand in Städten aufgrund des relativ geringen Angebotes in diesem Teilbestand.

Tabelle 2-9 dokumentiert die Annahmen zu den Extremausprägungen der Leerstände in den Raumtypen. In Anlage 2 wird eine Übersicht der operationalisierten Interdependenzhypothesen für die 6 Raumtypen gegeben. Mit der Anwendung der hieraus resultierenden Interdependenzhypothesen wurden Leerstandsausprägungen für die Raumtypen berechnet. Diese sind in Abschnitt 2.2.5.2, Tabelle 2-10 dargestellt.

Tabelle 2-9: Annahmen für Extremausprägungen der Leerstände in den Raumtypen im Falle eines „hohen Angebotsüberhangs“

Raumtyp		Extrem-Leerstands- ausprägung im	
		EZFH	MFH
1	vorwiegend Kernstädte	5 %	11 %
2	Ländliche Kreise mit geringer Dynamik	8 %	11 %
3	Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik	7 %	11 %
4	vorwiegend Kernstädte	9 %	20 %
5	dünn besiedelte und häufig periphere Räume	15 %	20 %
6	Umlandkreise von Berlin und Kernstädten mit Suburbanisierungstendenzen	10 %	20 %

2.2.5.2 Grenzwertbetrachtung zur Schätzung von Leerstandsquoten für Raumtypen auf Basis der Interdependenzhypothesen

Die Schätzung von Leerstandsquoten für Raumtypen erfolgt im Rahmen einer Grenzwertbetrachtung. Dabei wird aus den möglichen Leerstands-Wertepaaren eines Raumtyps MFH_i/EZFH_i das Paar ermittelt, bei dem die Anzahl bewohnter Wohnungen, berechnet aus dem Wohnungsbestand abzüglich dem resultierenden Leerstand, gleich dem Wert der Anzahl bewohnter Wohnungen ist, der sich aus den Haushaltszahlen und einer angenommenen Haushalts-Wohnungsbelegung berechnet.

Die Kennziffer Haushalte pro Wohnung wird auf der Ebene der alten und neuen Länder geschätzt und pauschal auf die Raumtypen übertragen. Hierzu wird der Quotient aus der Gesamtzahl der Haushalte und der Gesamtzahl bewohnter Wohnungen gebildet. Die Gesamtzahl der Haushalte in 2005 wird entsprechend der Angaben der Raumordnungsprognose 2005 angenommen. Die Anzahl bewohnter Wohnungen wird mit Hilfe von Leerstandskennziffern ermittelt, die basierend aus Mikrozensusdaten vom Statistischen Bundesamt auf höher aggregierter Ebene ausgegeben werden (s. Tabelle 2-7). Hieraus errechnen sich für Westdeutschland aktuelle Belegungskennziffern in Höhe von 1,086, für Ostdeutschland in Höhe von 1,071.²³

Die Schätzung der Leerstandsquoten für die Raumtypen erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird über die Haushalte in Wohngebäuden (s. Abschnitt 2.2.4) und den oben genann-

²³ Die amtliche Statistik definiert Haushalte als Wirtschaftshaushalte. Demnach bilden Personen einer „Wirtschaftseinheit“, die diese im wirtschaftlichen Sinne gemeinsam führen, einen Haushalt. Hierbei können Fälle auftreten, in denen Wohnungen mit mehreren Haushalten belegt sind, zum Beispiel im Falle von Wohngemeinschaften, in denen sich mehrere getrennt wirtschaftende „Einheiten“ eine Wohnung teilen (s. hierzu auch Iwanow et al. 2005).

ten Belegungskennziffern (HH/Wo) die Anzahl bewohnter Wohnungen berechnet. Mit Hilfe vorläufig formulierter Leerstandshypothesen werden dann Leerstandspaare berechnet, bei denen die aus dem Wohnungsbestand berechnete Anzahl bewohnter Wohnungen gleich dem Wert ist, der sich aus der Berechnung über die Haushaltszahlen ergibt.

Das hieraus resultierende Zwischenergebnis der Leerstandszahlen wird auf aggregierter Ebene (Ost/West) auf Plausibilität geprüft. Dabei werden die hochgerechneten Leerstandsquoten in der Differenzierung EZFH und MFH mit den vorliegenden Mikrozensuswerten verglichen. In Orientierung der hier auftretenden Abweichungen erfolgten Anpassungen der Annahmen für die Extremausprägungen der Leerstände in den Raumtypen im Falle eines „hohen Angebotsüberhangs“ (Tabelle 2-9 zeigt die Ergebniswerte dieser Korrekturschleife).

Nach diesem Zwischenschritt der Plausibilitätsprüfung und Anpassung der Annahmen wird der Abgleich mit der aus dem Wohnungsbestand und den Haushalten berechneten Zahl bewohnter Wohnungen erneut vorgenommen und die hieraus resultierenden endgültigen Wertepaare für den Wohnungsleerstand in den Raumtypen ermittelt. Das Ergebnis hiervon zeigt Tabelle 2-10. Diese sind hinsichtlich der Struktur plausibel. Mindestleerstände (Vollbelegung) werden in keinem Fall erreicht. Auch die Abstufungen der Leerstandswerte zwischen den Raumtypen weisen keine Unplausibilitäten auf. Die Abweichungen auf kumulierter Ebene mit den statistischen Schätzwerten des Mikrozensus sind akzeptabel²⁴.

Tabelle 2-10: Leerstandsausprägungen für die Raumtypen, bezogen auf das Jahr 2005 (eigene Schätzung)

Raumtyp		EZFH	MFH
1	vorwiegend Kernstädte	3,1 %	6,0 %
2	Ländliche Kreise mit geringer Dynamik	7,5 %	10,3 %
3	Suburbane Kreise und ländliche Kreise mit größerer Dynamik	5,1 %	7,9 %
4	vorwiegend Kernstädte	6,0	12,5
5	dünn besiedelte und häufig periphere Räume	10,5	14,1
6	Umlandkreise von Berlin und Kernstädten mit Suburbanisierungstendenzen	6,0 %	11,5 %
Westdeutschland gesamt		5,4 %	7,4 %
Ostdeutschland gesamt		9,5 %	13,5 %

Eine entsprechende Grenzwertbetrachtung für den Betrachtungszeitpunkt t_1 (2020) wird im Rahmen der Anwendung des Konsistenzmodells vorgenommen (s. Abschnitt 5.1.1). Dabei werden ebenfalls die in Abschnitt 2.2.5.1 beschriebenen Interdependenzhypothesen zugrunde gelegt. Die Annahmen zur Haushaltsbelegung werden im Rückgriff auf die entsprechenden Annahmen aus 2005 geringfügig angepasst. Die für 2006 verwendeten Belegungskenn-

²⁴ Insgesamt unterschreiten die ermittelten kumulierten Leerstandswerte (Gesamtbestand) die statistischen Schätzwerten des Mikrozensus um 0,3 Prozentpunkte (Westdeutschland) bzw. 0,4 Prozentpunkte. Diese Abweichung prägt sich Westdeutschland in den Teilbeständen wie folgt aus: EZFH: -0,4 %-Punkte, MFH: 0,2 %-Punkte; Ostdeutschland: EZFH: +2,4 %-Punkte, MFH: -1,4 %-Punkte.

ziffern werden jeweils um geschätzte 2 % erhöht. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass aufgrund einer zu beobachtenden zunehmenden Versingelung und der Tendenz zu kleineren Haushalten der „WG-Effekt“²⁵ zunimmt. Damit ergeben sich für 2020 angenommene Haushaltsbelegungen von 1,108 für West und 1,092 für Ost.

2.3 Modellierung von Veränderungen im Bauwerksbestand „Gewerbe“

Die empirische Ausgangslage zur Abbildung der Entwicklung des Gewerbegebäudebestandes unterscheidet sich deutlich von der im Wohnungsbestand.

Neben Aussagen zu Wohnungen bzw. Wohngebäuden trifft die Bautätigkeitsstatistik auch Aussagen zu „Nichtwohngebäuden“: Hierunter werden Gebäude gefasst, „die überwiegend für Nichtwohnzwecke bestimmt sind, d.h. Gebäude, in denen mehr als die Hälfte der Gesamtnutzfläche Nichtwohnzwecken dient“ (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt 2009). Diese werden weiter unterschieden nach folgenden Gebäudearten:

- Anstaltsgebäude,
- Büro- und Verwaltungsgebäude,
- Landwirtschaftliche Betriebsgebäude,
- Nichtlandwirtschaftliche Betriebsgebäude, darunter
 - Fabrik- und Werkstattgebäude,
 - Handels- und Lagergebäude,
 - Hotels und Gaststätten,
- Sonstige Nichtwohngebäude.

Für diese Gebäudearten werden jährlich genehmigungspflichtige oder ihnen gleichgestellte Baumaßnahmen erfasst (s. auch Gruhler, Böhm 2008a: 6ff.). Die Statistik weist entsprechend dieser Gliederung die jährlichen Bestandsveränderungen aus²⁶. Dies umfasst u. a. Daten zu Baugenehmigungen, Baufertigstellungen und zu Gebäudeabgängen. Dabei werden u. a. Angaben zur Gebäudeanzahl, zur Nutzfläche und zum Rauminhalt der verschiedenen Nichtwohngebäude gemacht. Dies erfolgt seit 1991 im Rahmen des Veröffentlichungsprogrammes der Bautätigkeitsstatistik. Daten zum Bestand an Nichtwohngebäuden sind dagegen generell nicht vorhanden. Aus diesem Grunde können auch keine Einschätzungen zur Nutzung des Gebäudebestandes erfolgen, wie sie für den Bereich Wohnen vorgenommen wurden. Die Modellierung von Veränderungen im Bauwerksbestand „Gewerbe“ erfolgt deshalb ausschließlich unter Beachtung der abrufbaren Bestandsveränderungsdaten der jüngsten Entwicklung.

2.3.1 Jüngste Entwicklungen im Gewerbebaubestand

Zur Darstellung der jüngsten Entwicklung im Gewerbebaubestand und Entwicklung von spezifischen Kennzahlen von Bestandsveränderungen wird auf vorliegende Analysen von

²⁵ Zusammenschluss mehrerer Haushalte zu Wohngemeinschaften

²⁶ Auf Bundes- und Landesebene differenziert nach Gebäudearten, auf Ebene der Kreisfreien Städte und Landkreise nach Nichtwohngebäuden insgesamt.

Gruhler und Böhm zurückgegriffen, die diese im Rahmen der im Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung durchgeführten Vorhaben²⁷ durchgeführt haben.

Abbildung 2-5 zeigt die Nichtwohngebäude-Zugänge in Deutschland, die seit Beginn der Erhebung dieses Merkmals im Rahmen der Bautätigkeitsstatistik erfasst wurden, in der Unterscheidung nach den oben genannten Gebäudearten. Die unterschiedenen Gebäudearten tragen unterschiedlich stark zum Gesamtwuchs bei. Die höchsten Zuwächse weisen die Gebäudearten „Handel“ und „landwirtschaftliche Betriebsgebäude“ auf. Die geringsten Werte sind innerhalb der Gebäudearten „Anstaltsgebäude“ und „Hotels/Gaststätten“ zu verzeichnen. Die weiteren unterschiedenen Gebäudearten liegen im Mittelbereich. Auffallend ist, dass diese Relationen über den Erhebungszeitraum hinweg vergleichsweise stabil sind. Über alle Gebäudearten hinweg sind ähnliche Entwicklungstrends zu beobachten. In den ersten Jahren des dargestellten Zeitraums steigen die Werte nahezu aller Gebäudearten an und sinken in der Tendenz im Zeitverlauf auf ein Niveau ab, das leicht unter dem Ausgangszustand liegt. Eine Ausnahme bilden Anstaltsgebäude, die einen leichten Zuwachs in der Bautätigkeit aufweisen, die aber insgesamt gesehen nur wenig ins Gewicht fallen.

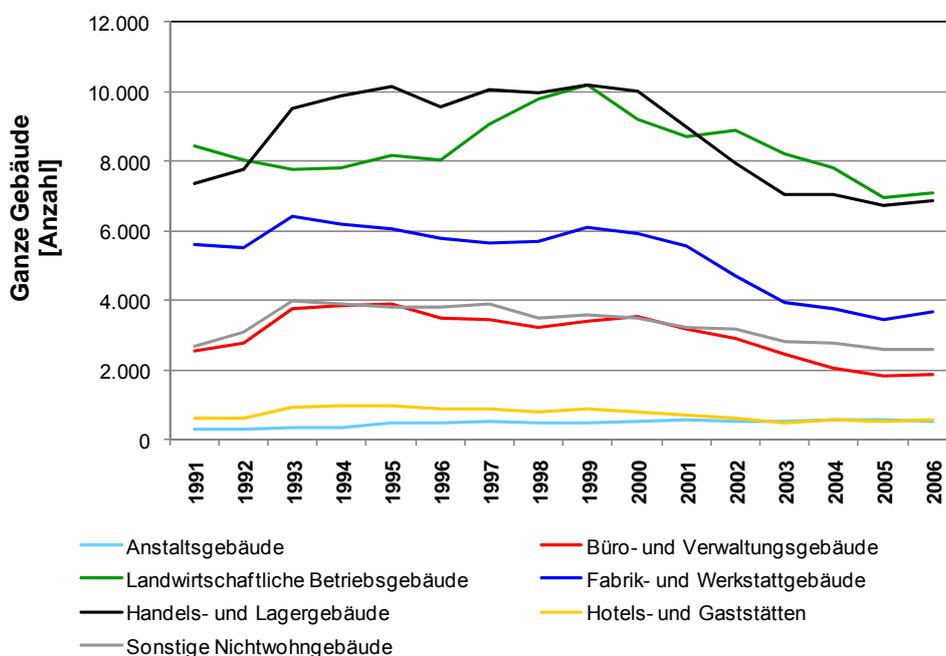


Abbildung 2-5: Entwicklung der Nichtwohngebäude – Baufertigstellungen neuer Gebäude in Deutschland seit 1991 (Quelle: Gruhler, Böhm 2008a auf Grundlage von Statistisches Bundesamt 1991-2007)

Analysen zu den Gebäudeabgängen liegen mit den Analysen von Gruhler und Böhm für den Zeitraum 2000 bis 2007 vor (Abbildung 2-6)²⁸. In der Tendenz sind die Relationen zwischen den Abgangszahlen der Gebäudearten ähnlich. Auffallend ist lediglich der vergleichsweise

²⁷ Gewerbestrukturen – Typenbildung und Ermittlung ökologischer Kenngrößen, s. auch Gruhler, Böhm (2008a und b).

²⁸ Daten zu Nichtwohngebäude-Abgängen sind in der Bautätigkeitsstatistik der Statistischen Jahrbücher (Bund. Länder) im Allgemeinen nicht ausgewiesen. Datenquelle ist die Fachserie 5/Reihe 1 „Bautätigkeit und Wohnungen“ des Statistischen Bundesamtes. Im Internet sind Daten ab 2000 frei abrufbar.

geringe Anteil abgehender Handels- und Lagergebäude gegenüber den landwirtschaftlichen Betriebsgebäuden, die beim Gebäudezugang ähnliche Größenordnungen aufweisen. Ähnlich wie beim Gebäudezugang ist aber auch hier hervorzuheben, dass die Abgangszahlen aller Gebäudearten in der Tendenz ähnliche Verläufe aufzeigen und die Relationen zwischen den Abgangszahlen der Gebäudearten vergleichsweise stabil bleiben. Auffallend ist aber auch, dass der Trend der Entwicklung der Abgangszahlen im verfügbaren Betrachtungszeitraum in der Wirkungsrichtung dem der Zugangszahlen entspricht. In beiden Fällen gehen die Fallzahlen leicht zurück oder bleiben stabil.

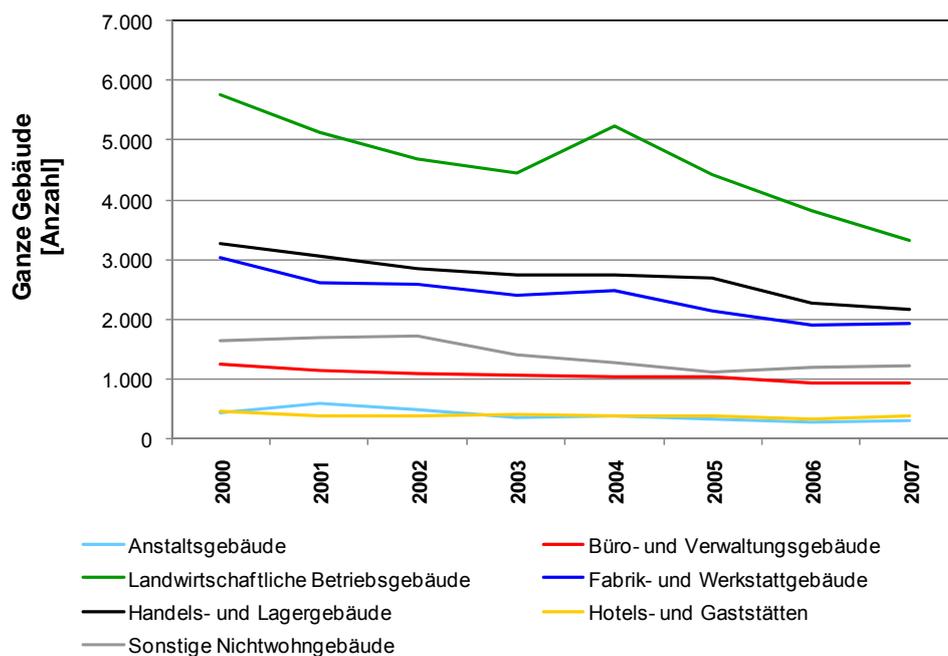


Abbildung 2-6: Entwicklung der Nichtwohngebäude – Bauabgänge ganzer Gebäude in Deutschland seit 2000 (Quelle: Gruhler, Böhm 2008a auf Grundlage von Statistisches Bundesamt 1991-2007)

2.3.2 Formulierung spezifischer Entwicklungskennziffern zur Abbildung von Veränderungen im Gewerbebaubestand

Ogleich die Aussagekraft der Analysen, auf die hier Bezug genommen wird, aufgrund der räumlichen und sachlichen Abstraktionsebene stark eingeschränkt ist, eignen sie sich doch für eine erste hypothetische Einschätzung möglicher Zusammenhänge zur Beschreibung der Entwicklungsdynamik im Bereich Gewerbe, auf die die hier vorzunehmende Modellierung der Bestandsveränderungen aufbauen kann. Diese hypothetische Einschätzung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Entwicklungsdynamik der Zu- und -abgänge von Gewerbebauten verläuft in den unterschiedenen Gebäudearten ähnlich. Neben branchenspezifischen Einflüssen scheint diese von einem branchenübergreifenden Megatrend beeinflusst zu sein, der auf alle Gebäudearten ähnlich wirkt.
- Dieser branchenübergreifende Megatrend wirkt hinsichtlich seiner Richtung auf die Zugangs- und Abgangszahlen ähnlich. Hieraus ist zu vermuten, dass ein Anstieg der Zugangszahlen mit einem Anstieg der Abgangszahlen einhergeht und umgekehrt.

Diese beiden Entwicklungshypothesen legen Fragen nahe, mit welcher Größe der branchenübergreifende Megatrend beschrieben werden könnte, der die Dynamik im Gewerbebaubestand beeinflusst. Hier kann ein Zusammenhang mit der demografischen Entwicklungsdynamik vermutet werden. So steht beispielsweise das potenzielle Arbeitskräfteangebot in engem Bezug zur demografischen Entwicklung. Das BBR berücksichtigt dies bei der Einschätzung der Entwicklung der Anzahl von Erwerbspersonen, die durch Verknüpfung der Personen im erwerbsfähigen Alter mit deren Erwerbsbeteiligung²⁹ erfolgt.

Basierend auf diesen Zusammenhängen wird die Annahme getroffen, dass das Arbeitskräfteangebot seinen Niederschlag auch in der Gewerbebaubestand findet. Wird von kurzfristigen Schwankungen des Arbeitskräfteangebotes abgesehen, die beispielsweise aus Schwankungen der Marktsituation resultieren können³⁰, kann dieser Zusammenhang auch zwischen der längerfristigen Entwicklung des Arbeitskräfteangebotes und der Entwicklung der Gewerbebaubestand erweitert werden.

Mittelfristig stehen mit der aktuellen Raumordnungsprognose Vorausberechnungen zur Entwicklung der Anzahl von Erwerbspersonen zur Verfügung (bis zum Jahr 2025). Auf Erwerbspersonen bezogene Entwicklungskennziffern können auch zur Abbildung von Veränderungen im Gewerbebaubestand herangezogen werden. Langfristig (über das Jahr 2025 hinaus) liegen hierzu aber keine Angaben vor. Aushilfsweise ist es aber angemessen, die langfristige Einschätzung der Veränderungsdynamik im Gewerbebaubestand (für das Jahr 2050) an den Entwicklungskennziffern der Bevölkerungszahl insgesamt festzumachen. Einflüsse der Verschiebungen der Altersstruktur sowie Veränderungen im Erwerbsverhalten können dabei nicht einbezogen werden. Es wird davon ausgegangen, dass auf aggregierten Raumebenen, die der langfristigen Betrachtung zugrunde liegen (Regionalisierung auf der Ebene Ost/West, s. auch Fußnote 18), grobe Entwicklungstrends durchaus abgebildet werden können.

Spezifische Entwicklungskennziffern zur Abbildung von Veränderungen im Gewerbebaubestand beziehen sich, wie im Abschnitt 2.3.1 dargestellt, auf die Trends der beiden genannten Bezugsgrößen Erwerbspersonen³¹ und Bevölkerungszahl. Die berechneten mittleren spezifischen Kennzahlen für Zu- und -abgänge im Gewerbebaubestand zeigt Tabelle 2-11³².

²⁹ Die Erwerbsbeteiligung wird mittels spezifischer Erwerbsquoten berechnet. Diese unterscheiden sich nach Geschlecht, Alter und Region und werden vom BBR in einem eigens entwickelten Verfahren geschätzt (BBR 2005b: 57ff.).

³⁰ Auch bei der Schätzung der Erwerbstätigenzahlen im Rahmen der Raumordnungsprognose bleiben Einflüsse kurzfristiger Schwankungen der Marktsituation unbeachtet (BBR 2005b: 57).

³¹ Bei der Entwicklung der auf die Erwerbspersonen bezogenen Größe wird als verfügbare Hilfsgröße zunächst die Personenzahl im erwerbsfähigen Alter herangezogen, die mit dem Personenkreis zwischen 15 bis 65 abgebildet wird. Die hieraus resultierende Kennziffer wird über die mittlere Erwerbsquote, die aus Daten von BBR 2005 für Deutschland berechnet werden kann, auf die Bezugsgröße „Erwerbspersonen“ umgerechnet.

³² Gebäudetyp „Sonstige Nichtwohngebäude“ ist nicht mit aufgeführt. Hierzu liegen keine Angaben zur Beschreibung von Volumen/Flächenverhältnisse vor (s. Abschnitte 3.3.2 ff.), so dass mit den verfügbaren Daten hierzu keine Stoffkennwertbildung erfolgen kann und dieser Gebäudetyp aus der Betrachtung herausgenommen wird.

Tabelle 2-11: Spezifische Entwicklungskennziffern zur Abbildung von Veränderungen im Gewerbebaubestand (eigene Berechnungen)

Gewerbegebäudetypen	Gebäude / (1000 Erwerbsperson * Jahr)		Gebäude / (1000 Einwohner * Jahr)	
	Zugang	Abgang	Zugang	Abgang
Anstaltsgebäude	0,015	0,015	0,006	0,005
Büro- und Verwaltungsgebäude	0,103	0,035	0,039	0,014
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	0,276	0,160	0,105	0,061
Fabrik- und Werkstattgebäude	0,177	0,083	0,067	0,032
Handels- und Lagergebäude	0,289	0,092	0,11	0,036
Hotels und Gaststätten	0,024	0,013	0,009	0,005

3 Baustoffkennwerte

Zur Abschätzung zukünftiger Bedarfe an mineralischen Baustoffen sowie der zu erwartenden Bauabfallströme gibt es verschiedene Studien, die jeweils unterschiedliche Ansätze verfolgen. So leitet ein vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung vorgelegtes Gutachten Rohstoffbedarfe aus Größen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung ab (DIW 1999). Philip Holzmann AG et al. (1997) ziehen Produktions- und Verbrauchsstatistiken heran, um stattgefundene Rohstoffverbräuche abzuschätzen. Andere fokussieren auf die Outputströme und setzen an Daten der amtlichen Abfallstatistik an (Dehoust, Küppers 2007). Allen genannten Ansätzen ist eine deduktive Herangehensweise gemein. Ausgehend von hoch aggregierten Statistiken werden Stoffflüsse im Bauwesen auf nationaler Ebene geschätzt. Einer regionalen Ausdifferenzierung der Aussagen dieser Top-down-Ansätze sind aufgrund der Gliederungstiefe der verwendeten Statistiken enge Grenzen gesetzt. In dieser Hinsicht weisen induktive Ansätze, die Stoffströme bottom-up auf Grundlage bauwerksbezogener Kennzahlen schätzen, deutliche Vorteile auf (z. B. Görg 1997, Buchert et al. 1999, Gruhler et al. 2002, Fleckenstein et al. 1998). Der methodische Kern dieser Arbeiten beruht darauf, Gebäudevertreter bestimmter Teilbestände hinsichtlich deren stofflicher Zusammensetzungen zu beschreiben und basierend darauf Hochrechnungen vorzunehmen. Die Gebäudevertreter werden dabei in der Regel so gewählt, dass eine Verknüpfung mit statistisch ausgewiesenen Daten der Gebäude- und Wohnungsstatistik erfolgen kann. Die in dieser Studie zu leistende Abbildung regionalisierter Baustoffflüsse baut auf diesem methodischen Ansatz auf. Hierzu werden gebäudetypologische Kennwerte formuliert, welche die baustoffliche Zusammensetzung typischer Gebäudevertreter des zukünftigen Zugangs und Abgangs in und aus dem Gebäudebestand beschreiben. Dabei erfolgt eine Fokussierung auf die im Sinne dieser Studie recyclingrelevanten Baustoffe³³.

Ähnlich wie bei der Modellierung der Bestandsentwicklung wird auch bei der Formulierung gebäudetypologischer Baustoffkennwerte, so weit möglich, auf vorhandene empirische Arbeiten zurückgegriffen. Für Wohngebäude liegen umfangreiche Untersuchungen zur baustofflichen Zusammensetzung typisierter Gebäude vor, die für die Modellierungsaufgabe verwendet werden können (s. Abschnitt 3.1). Für den Fall gewerblich genutzter Gebäude ist die empirische Ausgangslage deutlich weniger zufrieden stellend. Hier stehen vergleichbare Bemühungen der baustofflichen Charakterisierung von Gebäudetypen erst am Anfang. Erste Erkenntnisse über typische Ausprägungen von Gebäudestrukturmerkmalen verschiedener Gewerbe-Gebäudearten sowie eine grobe baustoffliche Beschreibung neu erstellter Gebäudebestände von Gruhler und Böhm (2008a und b) liefern jedoch eine gute Basis, auf der ein Hypothesengerüst zur Formulierung baustofflicher Kenngrößen für Gewerbebauten aufbauen kann (s. Abschnitt 3.3).

3.1 Spezifische Baustoffkennwerte für Wohngebäude

Zuerst sind Baustoffkennwerte für Wohngebäude zu erarbeiten, mit Hilfe derer die Baustoffzugänge und Baustoffabgänge auf der Ebene der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Raumtypen hochgerechnet werden können. Zwischen Baustoffkennwerten und Statistik muss die

³³ Im Abgang Betone und Ziegel, im Zugang Betone.

Anschlussfähigkeit sicher gestellt sein. Die Raumtypen konstituieren sich aus Daten der Ebene der Kreise. Auf Kreisebene unterscheidet die Gebäude- und Wohnungsstatistik bei der Beschreibung des Wohnungsbestandes zwischen Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern. Darüber hinaus sind Angaben zur Baualtersstruktur des Gebäude- und Wohnungsbestandes verfügbar³⁴. Damit ist die maximale sachliche Ausdifferenzierung gebäudetypologischer Baustoffkennwerte für Wohngebäude vorgegeben.

Die vorliegende Studie soll Aussagen zum erreichbaren Ressourcenschonungspotenzial unter Berücksichtigung möglicher Veränderungen im Gebäudebestand der gesamten Bundesrepublik treffen. Die Baustoffkennwerte müssen daher den Anspruch der Anwendbarkeit im gesamten Bundesgebiet erfüllen. Zur Abbildung der Baustoffabgänge sind baustoffliche Kenngrößen erforderlich, die sich auf den vorhandenen Gebäudebestand beziehen. Dieser ist entsprechend zu beschreiben. Baustoffzugänge beziehen sich dagegen bei der eingenommenen prognostischen Sichtweise auf zukünftige Bauweisen. Hier sind entsprechende Annahmen zu treffen.

Umfangreiche Arbeiten, die überregionale Aussagen zur baustofflichen Zusammensetzung von Gebäudetypen des Wohnens treffen, liegen mit den Arbeiten von Gruhler et al. (2002) sowie Buchert et al. (1999 sowie 2004) vor. In beiden Arbeiten werden Stoffkennwerte für definierte Gebäudetypen ausgewiesen. Gruhler et al. (2002) werten dazu Konstruktionsunterlagen vorliegender Gebäudetypologien aus und beschreiben unter Hinzuziehung historischer Baubeschreibungen deren stoffliche Zusammensetzung. Gebäudeausgangsdaten beziehen sich überwiegend auf einen von Schulze und Walther (1990 a und b) vorgelegten Gebäudeatlas (Gruhler et al. 2002:16ff.). Damit liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Gebäudebestand der neuen Länder. Aussagen zu möglichen Bauweisen zukünftiger Bauten werden nicht getroffen. Buchert et al. (1999 und 2004) beschreiben dagegen mit ihren Gebäudetypen synthetische Gebäude, die den Anspruch haben, durchschnittliche Eigenschaften von Teilbeständen des Gebäudebestandes Deutschlands abzubilden. Grundlagen hierfür sind baustoffliche Untersuchungen von Gebäudetypen, die 1997 von Görg vorgenommen wurden, energetische Untersuchungen von Gebäudetypen von IWU (1994), Datenrecherchen zum aktuellen Baugeschehen sowie Annahmen zur Entwicklung zukünftiger Bauweisen. Damit erfüllt diese Grundlage die Anforderungen, die eingangs hinsichtlich der zu formulierenden Stoffkennwerte genannt wurden. Sie bezieht sich ausdrücklich auf das gesamte Bundesgebiet und reflektiert neben baustofflichen Kompositionen im Gebäudebestand auch zukünftige Entwicklungen im Baugeschehen. Die vorliegende Arbeit baut darauf auf.

³⁴ Basierend auf Daten der jüngsten Vollerhebungen des Gebäude- und Wohnungsbestandes (West: 1987, Ost: 1995) wird der Gebäude- und Wohnungsbestand im Rahmen der Bautätigkeitsstatistik jährlich fortgeschrieben. Während das Merkmal „Gebäudegröße“ in der Unterscheidung EFH, ZFH, MFH fortgeschrieben wird, unterbleibt die Fortschreibung der Entwicklung der Baualtersstruktur des Bestandes, die im Zuge der laufenden Erneuerung ebenfalls einem stetigen Wandel unterliegt. Aktuelle Daten in der beschriebenen Differenzierung des Strukturmerkmals „Gebäudegrößen“ können auf Kreisebene somit direkt der Bautätigkeitsstatistik entnommen werden. Die Baualtersstruktur wird im Rahmen dieses Vorhabens in einem eigens entwickelten Verfahren fortgeschrieben (s. hierzu Ausführungen in Anlage 3).

3.1.1 Spezifische Baustoffkennwerte für den Wohngebäudebestand

Buchert et al. (1999 und 2004) verfolgen mit Ihrer Gebäudetypologie einen deutlich breiter angelegten Modellierungszweck als in der vorliegenden Arbeit verfolgt wird. Die Stoffkennwerte unterscheiden die 5 Hauptbaustoffgruppen Mineralische Baustoffe, Holz, Metalle, Kunststoffe und sonstige Baustoffe innerhalb derer eine weitere Differenzierung nach Einzelbaustoffen erfolgt. Aus stofflicher Sicht liegt das Interesse auf den im Rohbau verbauten Baustoffen³⁵. Weiter orientiert sich die Gliederungssystematik der von Buchert et al. (1999 und 2004) vorgelegten Gebäudetypologie an energetischen Fragestellungen des Betriebs des Gebäudebestands sowie an Fragen des spezifischen Erschließungsaufwandes sowie der Flächeninanspruchnahme typischer Gebäudevertreter. Hierzu unterscheiden sie 36 Bestandsgebäudetypen nach den Kriterien Gebäudegröße und Epoche (Baualter), damit auch verbunden die vorherrschende Bauweise sowie die regionale Zuordnung. Hinsichtlich der Gebäudegröße werden Einfamilienhäuser von in Größenklassen eingeteilten Mehrfamilienhäusern unterschieden. Die Einteilung nach Baualtersklassen orientiert sich in erster Linie an der Entwicklung energetischer Standards im Gebäudebestand. Mit der Unterscheidung zwischen Ost und West wird versucht, konstruktive Besonderheiten mit Einfluss auf die genannten Zielkategorien zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser Studie stehen dagegen baustoffliche Fragen im Zusammenhang des hochwertigen Recyclings mineralischer Baustoffe im Vordergrund. Der Schwerpunkt liegt damit auf der Abbildung der recyclingrelevanten Baustoffe im Gebäudebestand. Die Grenzen der sachlichen Gliederung der Merkmale Gebäudegröße und Baualter werden durch die in der Wohnungsstatistik gebildeten Klassen vorgegeben. Somit kann hinsichtlich der Gebäudegröße maximal zwischen Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern sowie nach Baualtersklassen unterschieden werden. Entlang dieser Struktur werden die bei Buchert et al. (1999 und 2004) aufgeführten Gebäudetypen als Referenzgebäude für Teilbestände des Gebäudebestandes in Deutschland interpretiert und zu neuen Gebäudekennwerten zusammengefasst. Hinsichtlich der Gebäudegröße wird zwischen Ein- und Zwei-Familienhäusern und Mehrfamilienhäusern unterschieden. In Anlehnung an die von Buchert et al. (1999 und 2004) vorgenommene Zuordnung der Gebäudetypen zu Baualtersklassen werden 4 Bestandsaltersklassen gebildet. Hieraus ergibt sich eine 2x4-Matrix der Beschreibung spezifischer Stoffkennwerte des Wohnungsbestandes (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Grundstruktur der spezifischen Baustoffkennwerte für Bestands-Wohngebäude³⁶

	bis 1918	1919 bis 1948	1949 bis 1968	1969 bis 1990
Ein- und Zweifamilienhaus (EZFH)	EZFH1	EZFH2	EZFH3	EZFH4
Mehrfamilienhaus (MFH)	MFH1	MFH2	MFH3	MFH4

³⁵ Der „Rohbau“ umfasst hier die Bauelemente Wände (einschließlich Putze), Decken, Dach, Gründung, Fundament, Fenster und Türen. Damit ist das mineralische Stofflager der Gebäude weitestgehend beschrieben. Ausbau und damit auch Haustechnik wird von Buchert et al. (1999 und 2004) nicht stofflich nicht abgebildet.

³⁶ Gebäude, die nach dem Jahr 1990 gebaut sind, werden in der genannten Studie mit Neubaugebäudetypen beschrieben.

Für die Gebäudetypen aus Buchert et al. (1999 und 2004) liegen mit dem in dieser Arbeit entstandenen Datensatz „BASiS2“ außerdem Beschreibungen der Gebäude hinsichtlich Wohnungsanzahl und Gebäudealter vor. Als Bezugsgröße wird die Wohnungsanzahl gewählt, da mit dieser Größe Bestandsveränderungen modelliert werden (s. Kapitel 3 und Abschnitt 6.1). In Ermangelung einer statistisch gesicherten Gewichtung der den oben gebildeten Gruppen zugeordneten „BASiS2“-Gebäudetypen werden deren spezifische Stoffkennwerte als Wertemöglichkeit innerhalb der jeweiligen Gruppen interpretiert. Die Kennwertbildung innerhalb der Gruppen erfolgt durch Mittelwertbildung der spezifischen Stoffkennwerte aller zugeordneten Gebäudetypen für die Einzelbaustoffebene. Diese einzelbaustoffbezogenen Mittelwerte werden zusammengefasst und damit synthetische Gebäude, bezogen auf die in Tabelle 2-1 genannten Gruppen, gebildet. Innerhalb der Stoffkennwerte der so gebildeten Gebäudetypen dominiert die Hauptgruppe mineralischer Baustoffe mit einem Anteil von 94 % bis 98 %. Die spezifischen Baustoffmassen zeigen deutliche Unterschiede zwischen den EZFH- und MFH-Gebäudetypen. Die Unterscheidung der Kennwerte nach diesen Hauptgruppen ist damit sinnvoll. Innerhalb dieser Hauptgruppen ist die Varianz der spezifischen Gesamtbaustoffmassen vergleichsweise gering. Anders zeigt sich dies beim Anteil der Betone an der Gesamtmasse, dem Massenbaustoff, der im vorliegenden Vorhaben im Zentrum des Interesses steht. Dieser Anteil unterscheidet sich sowohl innerhalb der EZFH-Gebäude als auch innerhalb der MFH-Gebäude deutlich zwischen den nach Baualter unterschiedenen Gebäudetypen. Mit abnehmendem Baualter nehmen diese Anteile jeweils zu. Somit ist auch die Beibehaltung dieser Ausdifferenzierung der Stoffkennwerte sinnvoll.

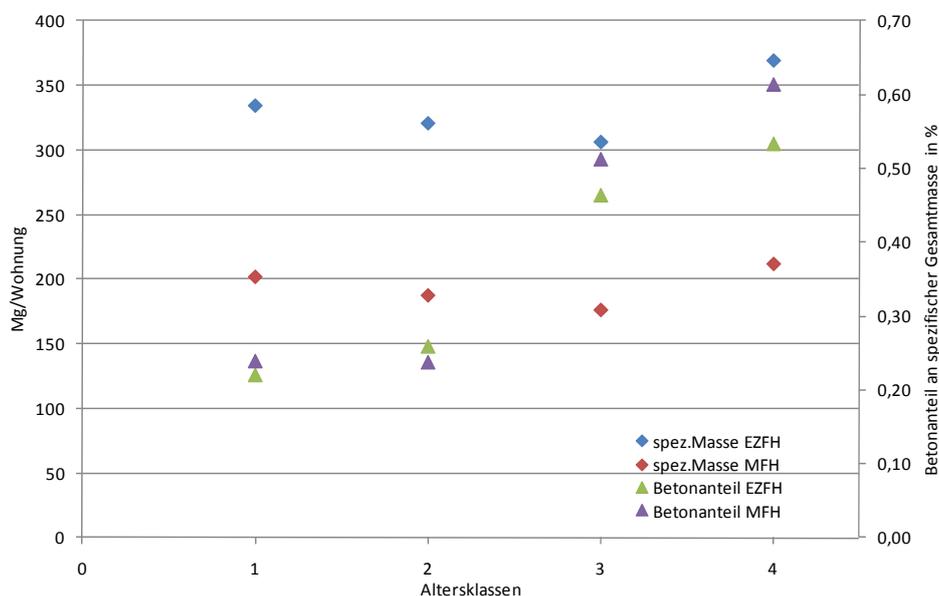


Abbildung 3-1: Spezifisches Gesamtstofflager je Wohnung sowie Betonanteil am Baustofflager der unterschiedenen Bestandsgebäudetypen

Eine weitere regionale Unterscheidung der Gebäudetypen nach Ost/West, wie sie im Quelldatensatz von BASiS2 vorgenommen wird, ist dagegen nicht sinnvoll. Zu gering sind die Unterschiede hinsichtlich der Gesamtmasse und der Betonanteile innerhalb der gebildeten Gruppen: Tabelle 3-2 zeigt das Ergebnis der Stoffkennwertbildung nach den unterschiede-

nen Gebäudetypen in der Übersicht. Stoffkennwerte für Betone³⁷ und Ziegel sind gesondert ausgewiesen. Diese beiden Größen werden für die Berechnung des recyclingrelevanten Outputstroms aus dem Wohngebäudebestand herangezogen. Darüber hinaus werden die Stoffkennwerte der anderen Baustoffhauptgruppen hier mit aufgeführt.

Tabelle 3-2: Baustoffkennwerte der unterschiedenen Bestands-Wohngebäudetypen in Mg/Wohnung

Gebäudetyp	Epoche	Gesamt (Mg/WE)	Davon (Mg/WE)						
			Mineralisch	darin		Holz	Metall	Kunststoff	Sonst
				Betone	Ziegel				
EFH-1	bis 1918	334,09	313,21	73,42	124,83	16,78	1,06	0,17	2,87
EFH-2	1919 bis 1948	320,34	300,87	82,80	116,06	12,07	4,58	0,16	2,66
EFH-3	1949 bis 1968	305,81	290,86	141,68	4,38	7,95	3,89	0,17	2,94
EFH-4	1969 bis 1990	369,18	356,30	196,78	9,26	5,87	2,99	0,21	3,81
MFH-1	bis 1918	201,95	189,28	48,32	72,19	8,76	2,32	0,07	1,52
MFH-2	1919 bis 1948	187,63	176,05	44,60	67,66	8,02	2,13	0,07	1,36
MFH-3	1949 bis 1968	176,33	172,26	90,39	7,52	0,70	1,73	0,06	1,57
MFH-4	1969 bis 1990	211,96	206,27	130,10	6,21	0,35	2,41	0,06	2,87

3.1.2 Spezifische Baustoffkennwerte für den Wohnungsneubau

Um Stoffkenngrößen für den Neubau zu formulieren, müssen Annahmen über mögliche Entwicklungen der Konstruktionsweise im zukünftigen Neubau getroffen werden. Umfassende Recherchen sind in diesem Vorhaben hierzu nicht vorgesehen. In Buchert et al. (1998 und 2004) werden solche Fragen im Rahmen der Formulierung alternativer Bestandentwicklungsszenarien behandelt. Basierend auf Analysen von Daten aktueller Bauten des Baukosteninformationszentrums Deutscher Architektenkammern (BKI) und Marktrecherchen werden 7 Grundtypen des Neubaus beschrieben, davon 4 EZFH-Typen und 3 MFH-Typen. EZFH-Typen werden nach ihrer Bauweise in freistehendes EFH, Reihenhaus, Doppelhaus und Zweifamilienhaus unterschieden und die MFH-Typen nach Gebäudegröße in MFH mit 3-6, 7-12 und mehr als 12 Wohnungen eingeteilt. Diese repräsentieren typische konventionelle Bauweisen (Massivbauweise) im Wohnungsbau. Sie stellen, wie auch die Bestandstypen, synthetische Gebäude mit durchschnittlichen Bauelementzusammensetzungen dar. Ausgehend davon wurden im Diskurs mit Vertretern unterschiedlicher Akteursgruppen aus dem Bereich Bauen und Wohnen im Rahmen des genannten Vorhabens denkbare Entwicklungspfade zukünftiger Bauweisen entworfen. Einer der Schwerpunkte liegt dabei auf der Reflexion möglicher Entwicklung des Holzanteils in einzelnen Bauteilen. Basierend auf diesem Diskurs werden in der genannten Studie hierzu entsprechende Annahmen getroffen. Dabei wird unterschieden zwischen Massivbauweise (konventionell) und Gebäude mit „erhöhtem Holzanteil“. Die in der Datenbank implementierten Annahmen mit Relevanz für das

³⁷ Hinsichtlich der Aufbereitung ist es ohne Relevanz, aus welchen Festigkeits-, und Expositionsclassen sich der Strom der angehenden Betone zusammensetzt. Deshalb wird diesbezüglich nicht weiter differenziert.

hier zu bearbeitende Thema sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst³⁸. Signifikante Unterschiede zwischen konventioneller Massivbauweise und Bauweise mit erhöhtem Holzanteil werden nur bei EZFH-Gebäuden gemacht. Bei MFH-Gebäuden beschränkt sich die vorgenommene Unterscheidung auf die Materialart der Fenster, die für mineralische Baustoffe ohne Belang sind.

Tabelle 3-3 In der verwendeten Datenbank aus BASiS2 implementierte Annahmen zum erhöhten Holzanteil in Zubautypen

Betroffener Gebäudetyp	Betroffenes Bauelement ³⁹	Konstruktionsweise	
		Konventionell	Erhöhter Holzbauanteil
alle EZFH-Typen	Innenwand	5 %	50 %
	Außenwand Obergeschoss	5 %	50 %
	Decken	22,3 %	43,4 %
	Fenster	51,4 %	100 %
alle MFH-Typen	Fenster	37,5 %	100 %

Zur Formulierung von Stoffkennwerten für den Zubau an Wohnungen werden die in BASiS2 unterschiedenen Konstruktionsweisen als mögliche Entwicklungsvarianten interpretiert. Analog zum Vorgehen bei der Formulierung der Kennwerte für die Bestandsgebäude werden entsprechende spezifische Baustoffkennzahlen gebildet. Hier erfolgt jedoch lediglich eine Unterscheidung nach der Gebäudegröße wie sie der Bestandsmodellierung zugrunde liegt. Dort werden EZFH von MFH unterschieden. Die Unterscheidung nach den Hauptbaustoffgruppen Mineralische Baustoffe, Holz, Metall, Kunststoffe und sonstige Baustoffe wird im Modell mitgeführt, aber im weiteren Verlauf im Hinblick auf die mineralischen recyclingrelevanten Baustoffe eingegrenzt. Der Baustoff Ziegel ist im Zubau nicht recyclingrelevant und wird daher in den Potenzialberechnungen nicht gesondert aufgeführt. Im Zubau kann auch auf eine weitere Differenzierung des Baustoffs Beton verzichtet werden. Die Vorgaben für die zulässige Menge an RC-Gesteinskörnung stehen im Zusammenhang mit der Festigkeits- und Expositionsklasse der Betone. Diese berücksichtigen besondere Anforderungen an den Baustoff bei erhöhter Beanspruchung durch Frost und bei erhöhtem Risiko „chemischer Angriffe“, wenn die betroffenen Bauteile einem erhöhten mechanischen Verschleiß ausgesetzt sind (s. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. 2004). Für den Wohnungsbau ist aber anzunehmen, dass keine erhöhten Anforderungen bezüglich der Abwehr chemischer Beeinträchtigungen sowie mechanischer Beanspruchungen bestehen. Betonbauteile, die einem erhöhten Frostrisiko ausgesetzt sind, sind im Wohnungsbau zwar denkbar, hiervon ist bei derzeitiger Entwicklung der Konstruktionsweisen im Wohnungsbau jedoch nur in Ausnahmefällen auszugehen. Sichtbetonfassaden, wie sie in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts noch häufiger anzutreffen waren, verbieten sich in der Regel inzwischen schon aufgrund deren mangelnder Wärmedämmeigenschaften. Deshalb kann auch im

³⁸ Zudem wird zwischen unterschiedlichen Energiestandards unterschieden. Diese für energetische Untersuchungen grundlegenden Festlegungen haben für die Untersuchung von Baustoffströmen nur marginalen Einfluss und werden deshalb hier nicht reflektiert.

³⁹ Aufgeführt sind nur die Bauelemente, bei denen eine Unterscheidung des Bauelementemixes zwischen „Konventionell“ und „Erhöhter Holzanteil“ vorgenommen wird.

Zubau auf eine weitere Differenzierung des Baustoffs Beton verzichtet werden. Tabelle 3-4 fasst die gebildeten spezifischen Stoffkennwerte als Übersicht zusammen. Diese werden für Bestandsgebäude der Altersklasse von 1991 bis 2005 (s. Ausführungen im vorangegangenen Abschnitt) sowie für den Zugang angewendet. Relevant für die Schätzung der Ressourcenschonungspotenziale sind beim Abgang die Baustoffe Beton und Ziegel, beim Zugang lediglich der Baustoff Beton (s. Kapitel 4). Die Werte für die Baustoffhauptgruppen werden in der Tabelle informativ mit aufgeführt.

Tabelle 3-4: Baustoffkennwerte der unterschiedenen Neubau-Wohngebäudetypen in Mg/Wohnung

Gebäudetyp	Gesamt	davon						
		Mineralisch	darin		Holz	Metall	Kunststoff	Sonst.
			Betone	Ziegel				
EZFH	290,4	271,0	168,7	19,03	12,0	3,3	0,8	3,3
MFH	214,9	208,5	123,4	13,89	1,7	3,1	0,2	1,4

3.2 Regionale Stofflager im Wohngebäudebestand

Für den Wohngebäudebestand können auf Grundlage gebäudespezifischer Kennzahlen Hochrechnungen zum Baustofflager vorgenommen werden. Die Angaben zum Wohnungsbestand werden mit den Kennzahlen verknüpft, die sich aus der sachlichen Gliederung der Tabelle 3-1 ergeben⁴⁰. Solche Hochrechnungen liegen als Zwischenergebnis der Modellierungsarbeit für die Ebene der Kreise vor. Das Gebäude-Baustofflager ist für die Beantwortung der Forschungsfrage nicht unmittelbar relevant. Für die Berechnung der Ressourcenschonungspotenziale sind nur Stoffstromgrößen (Abgänge, Zugänge) erforderlich. Obgleich die Ergebnisse also nicht unmittelbar in die Berechnung der RESPOT einfließen, werden sie an dieser Stelle kalkuliert und dokumentiert, um Nachfolgeprojekten Analysemöglichkeiten zu eröffnen, die über den abgesteckten Betrachtungsrahmen des Vorhabens hinausreichen.

Aktuelle Bestandsdaten liegen in der Differenzierung nach EZFH und MFH im Rahmen der Fortschreibung des Gebäude- und Wohnungsbestandes vor. Diese Fortschreibung rechnet die jährliche Bautätigkeit in die Datensätze der letzten Gebäudezählung ein. Für die Differenzierung nach Baualterklassen liegen entsprechende Daten nur in der Aktualität jüngster Vollerhebungen des Gebäude- und Wohnungsbestandes vor. In Westdeutschland erfolgte diese im Jahr 1987 und in den neuen Ländern im Jahr 1995. Auf Grundlage dieser Quellen kann eine Schätzung der aktuellen Baualterstruktur erfolgen, die im Rahmen dieses Vorhabens bezogen auf das Jahr 2005 vorgenommen wurde (s. Anlage 3).

Das zusammengefasste Ergebnis der vorgenommenen Hochrechnung regionaler Stofflager im Wohngebäudebestand zeigt Tabelle 3-5. In der Tabelle wird nach Ost/West⁴¹ gegliedert und nach den Baustoffhauptgruppen unterschieden. Zusätzlich sind die mineralischen Stoffe

⁴⁰ ergänzt durch die Altersklasse 5 (1991 bis 2005)

⁴¹ In Anlage 4 erfolgt eine differenzierte Darstellung der regionalisierten Stofflager auf Kreisebene.

in die für diese Studie recyclingrelevante Baustoffe untergliedert. Die räumliche Verortung des Lagers ist in der Differenzierung nach Kreisen aus Abbildung 3-2 ersichtlich.

Tabelle 3-5: Zusammengefasstes Ergebnis der Hochrechnungen zum regionalisierten Baustofflager im Wohngebäudebestand nach Hauptbaustoffgruppen

Gebiet	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
	Gesamt	Mineralisch	davon		Holz	Metall	Kunststoff	Sonst
			Betone	Ziegel				
Westdeutschland und Berlin	8388,1	8015,2	3882,7	999,1	197,8	88,5	6,4	80,3
Ostdeutschland	1739,6	1654,9	713,6	339,6	49,1	17,8	1,2	16,5
Deutschland	10127,7	9670,2	4596,3	1338,7	246,9	106,3	7,6	96,8

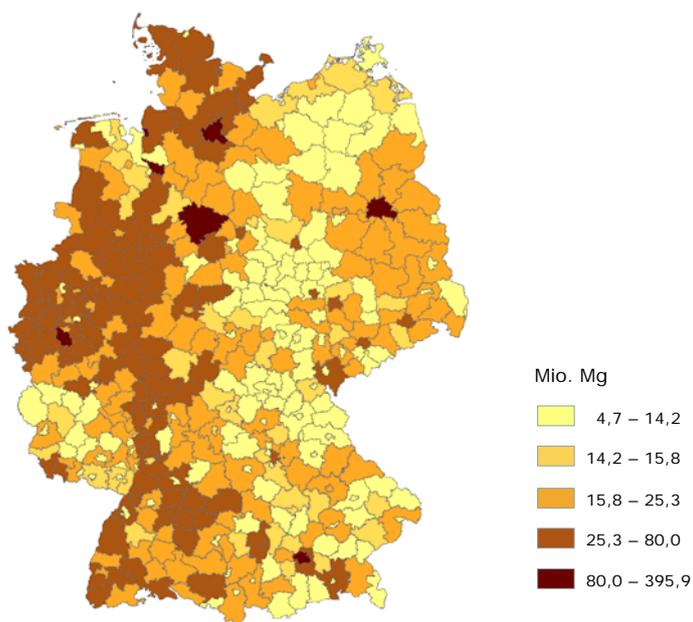


Abbildung 3-2: Räumliche Verortung des regionalisierten Baustofflagers auf der Ebene der Kreise (angegeben ist die kumulierte Größe des Gesamtbaustofflagers in den jeweiligen Kreisen) (eigene Darstellung)

3.3 Spezifische Baustoffkennwerte für Gewerbegebäude

Die Beschreibung von Baustoffkennwerten für Gewerbegebäude greift auf vorliegende Arbeiten von Gruhler und Böhm (Gruhler, Böhm 2008a und 2008b; Deilmann, Gruhler 2009) zurück. Diese umfassen Analysen von empirischen Daten zur baustofflichen Beschreibung neu erstellter Gebäudebestände der Bautätigkeitsstatistik sowie Analysen empirischer Daten zu Flächenausprägungen dokumentierter Bauvorhaben, die in der Datenbank des Baukosteninformationszentrums Deutscher Architektenkammern (BKI) erfasst sind. Auf Basis dieser Daten kann ein Hypothesengerüst aufgebaut werden, das die Formulierung spezifischer Stoffkennwerte für Gewerbegebäudearten erlaubt. Die Analysen konzentrieren sich entsprechend der Schwerpunktsetzung dieses Vorhabens auf die Baustoffgruppen der Betone und Ziegel.

Zunächst wird an dieser Stelle ein Überblick über die methodischen Schritte gegeben, entlang derer die Kennzahlbildung erfolgt, bevor in den nachfolgenden Ausführungen die einzelnen Teilschritte näher beleuchtet werden. Abbildung 3-3 zeigt die entwickelten methodischen Schritte der Kennzahlbildung im Überblick. Den Ausgangspunkt des Verfahrens bilden die erwähnten baustofflichen Beschreibungen neu erstellter Gebäudebestände von Gruhler und Böhm (s. Gruhler, Böhm 2008a)

Unter Nutzung von Angaben der Bautätigkeitsstatistik erfolgt in der genannten Arbeit eine Analyse der Baustoffstruktur der in Abschnitt 2.3 eingeführten Gebäudearten. Basierend auf jährlichen Zugangsdaten werden prozentuale baustoffliche Zusammensetzungen von gewerblichen Gebäudearten herausgearbeitet. Auf dieser Grundlage kann – ähnlich zum Vorgehen bei der Kennzahlenbildung im Wohnungsbau – eine archetypische Beschreibung baustofflicher Kompositionen gewerblicher Gebäudetypen erfolgen. Dabei muss jedoch eine wesentliche Einschränkung akzeptiert werden. Die verwendeten Angaben der Bautätigkeitsstatistik treffen Aussagen zum überwiegend verwendeten Baustoff von Gewerbegebäuden und beziehen diese Aussagen auf den entstandenen Bruttorauminhalt. Auf Grundlage dieser Daten kann somit die Baustoffstruktur von Gewerbeteilbeständen (unterschieden nach Gebäudearten) eingeschätzt werden. Aussagen zum Volumen bzw. zur Masse der verwendeten Baustoffe können jedoch nicht getroffen werden, da lediglich der Bezug zum Bruttorauminhalt hergestellt wird. Deshalb knüpfen hieran mehrere aufeinander aufbauende Schätzschritte an, an deren Ende analog zu den im Wohnungsbau formulierten Kennzahlen massenbezogene Baustoffkennwerte für Gewerbe-Gebäudearten stehen.

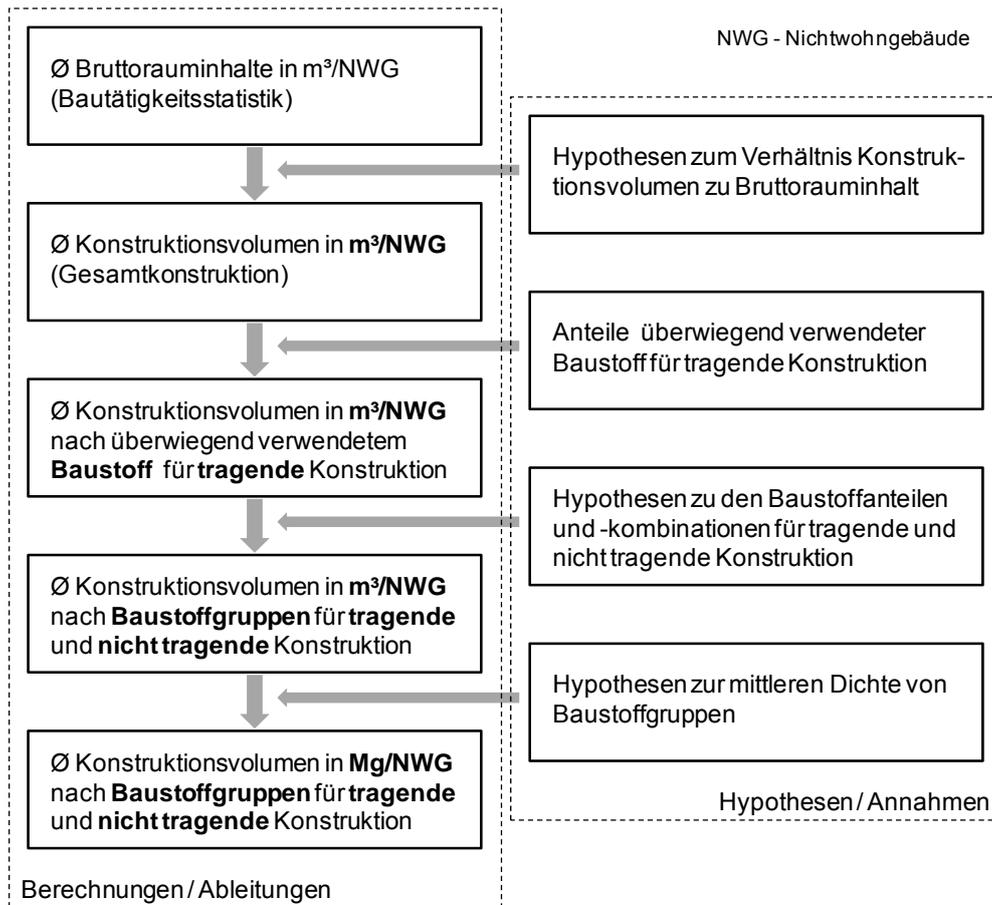


Abbildung 3-3: Übersicht über die methodischen Schritte der Kennzahlenbildung für Gewerbegebäude

In einem ersten Schritt werden für die unterschiedlichen Nichtwohngebäudearten die im Rahmen von statistischen Auswertungen ermittelten mittleren Bruttorauminhalte pro Gebäude in mittlere Konstruktionsvolumen pro Gebäude umgerechnet. Um diese Umrechnung zu ermöglichen, wurden auf Grundlage von empirischen Untersuchungen zu Grundflächen und Volumen für die unterschiedlichen Nichtwohngebäudearten Hypothesen zum Verhältnis von Konstruktionsvolumen zu Bruttorauminhalt abgeleitet (vgl. Gliederungspunkt 1.2). Das mittlere Konstruktionsvolumen in Kubikmeter pro Nichtwohngebäude spiegelt dabei die Gesamtkonstruktion wider. Die Gesamtkonstruktion eines Gebäudes muss mehrere Funktionen erfüllen: Tragfunktion (Gewährleistung der Standsicherheit), Hüllfunktion (Schaffung zur Außenluft abgeschlossener Räume unter Beachtung des Wärmeschutzes) und Schutzfunktion (äußere Wetterschutzschicht). Damit sind sowohl tragende als auch nicht tragende Bauteile bzw. Bauelemente in die Gesamtkonstruktion integriert.

In den Amtlichen Statistiken werden Aussagen zum überwiegend für die tragende Konstruktion verwendeten Baustoff gemacht. Dementsprechend lässt sich eine Baustoffstruktur für die tragenden Konstruktionen der verschiedenen Nichtwohngebäudearten ableiten (vgl. Gliederungspunkt 1.2). Diese Struktur, die angibt, zu welchen Anteilen die Baustoffe Stahl, Stahlbeton, Holz, Ziegel, sonstiger Mauerstein sowie sonstiger Baustoff für die tragende

Konstruktion Verwendung finden, dient der Differenzierung des mittleren Konstruktionsvolumens in Kubikmeter pro Nichtwohngebäude nach überwiegend für die tragende Konstruktion verwendeten Baustoffen.

Da das mittlere Konstruktionsvolumen nach überwiegend für die tragende Konstruktion verwendeten Baustoffen sowohl alle tragenden, als auch alle nicht tragenden Bauteile bzw. Bauelemente beinhaltet, die Baustoffstruktur jedoch nur für den tragenden Teil der Konstruktion gültig ist, muss in einem weiteren Schritt die Differenzierung in tragend und nicht tragend vorgenommen werden. Dafür wurden Hypothesen zu den Baustoffanteilen und Baustoffkombinationen für die tragende und nicht tragende Konstruktion abgeleitet (vgl. Gliederungspunkt 1.2.3). Das Ergebnis sind nach „tragend“ und „nicht tragend“ sowie Baustoffgruppen differenzierte, mittlere Konstruktionsvolumen in Kubikmeter pro Nichtwohngebäude.

In nächsten Schritt werden die volumenbezogenen mittleren Konstruktionsvolumen mit Hilfe von Annahmen bzw. Schätzungen zur mittleren Dichte von Baustoffen bzw. Baustoffgruppen in massebezogene Größen umgerechnet (s. Abschnitt 3.3.4). Danach stehen nach „tragend“ und „nicht tragend“ sowie baustoffgruppendifferenziert mittlere Konstruktionsvolumen in Megatonnen pro Nichtwohngebäude für weitere Kalkulationen und Hochrechnungen zur Verfügung.

3.3.1 Baustoffstruktur von Gewerbebauten

In den Amtlichen Statistiken (Statistische Jahrbücher der Bundesrepublik Deutschland, Statistische Jahrbücher der Bundesländer, Fachserie 5/Reihe 1 „Bauen und Wohnen“ des Statistischen Bundesamtes) sind für den Bereich der Nichtwohngebäude (und damit auch der Gewerbegebäude) Informationen zur Baustoffstruktur in Form des überwiegend für die Tragkonstruktion verwendeten Baustoffes aufgeführt. Der überwiegend verwendete Baustoff ist dabei wie folgt definiert: „Überwiegend verwendeter Baustoff ist derjenige, der bei der Erstellung der tragenden Konstruktion des Gebäudes überwiegend Verwendung findet“. (Statistisches Bundesamt 1999)

Die Daten zum überwiegend für die Tragkonstruktion verwendeten Baustoff sind generell nur im Rahmen der Statistik der Baugenehmigungen aufgeführt. Für die eingangs aufgeführten verschiedenen Nichtwohnbau-Gebäudearten (Abschnitt 2.3) werden entsprechende Angaben gemacht. Dabei wird für jede Nichtwohngebäudeart angegeben, zu wie viel Prozent die tragenden Konstruktionen der neuen Gebäude überwiegend aus Stahl, Stahlbeton, Holz, Ziegel, sonstigem Mauerstein sowie sonstigem Baustoff bestehen. Diese Prozentangaben beziehen sich entweder auf die Gesamtanzahl oder den Gesamtrauminhalt neu errichteter Gebäude. Je nach Bezug – Gebäudeanzahl oder Rauminhalt – ergeben sich verschiedene Ergebnisse. In der Fachserie 5/Reihe 1 „Bautätigkeit und Wohnen“ sind die Angaben zum überwiegend verwendeten Baustoff sowohl auf die Gebäudeanzahl als auch den Rauminhalt bezogen ausgewiesen. Die Auswertung der entsprechenden Daten verdeutlicht die unterschiedlichen Ergebnisse (Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5).

Überwiegend verwendeter Baustoff (Bezug: Gebäude)

(Mittelwerte Bund 1997-2004 - Baugenehmigungen, Errichtung neuer Gebäude)

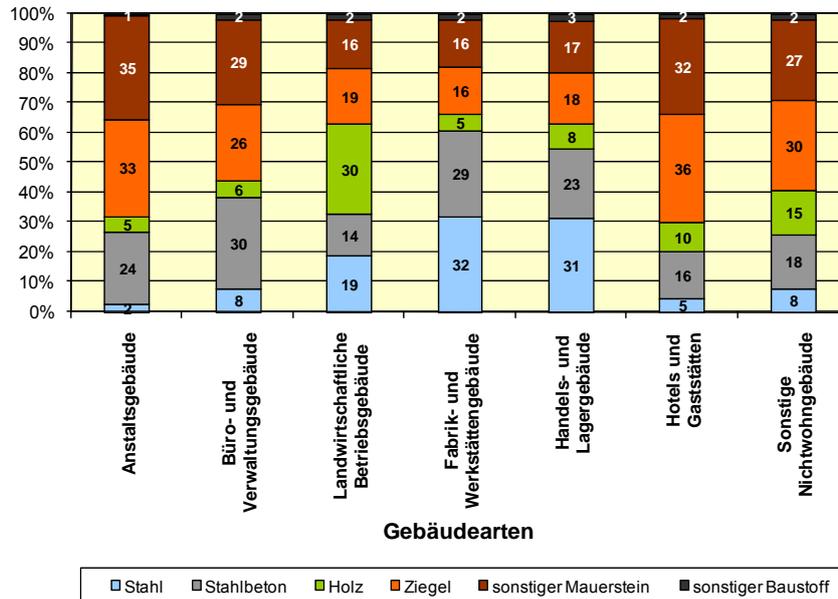


Abbildung 3-4: Baustoffanteile (Bezug: Gebäude) verschiedener Gebäudearten – Mittelwerte für den Bund (Datenquelle: Fachserie 5/Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes)

Überwiegend verwendeter Baustoff (Bezug: Rauminhalt)

(Mittelwerte Bund 1997-2004 - Baugenehmigungen, Errichtung neuer Gebäude)

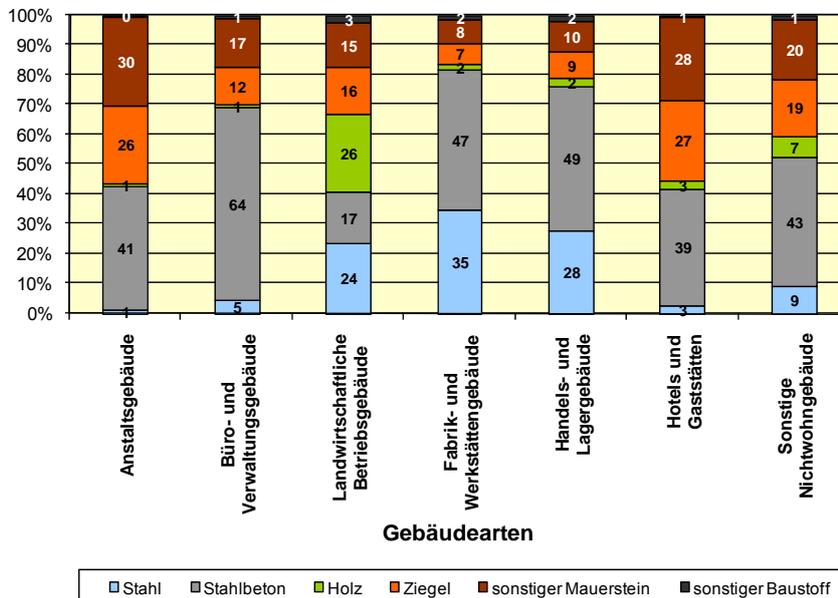


Abbildung 3-5: Baustoffanteile (Bezug: Rauminhalt) verschiedener Gebäudearten – Mittelwerte für den Bund (Datenquelle: Fachserie 5/Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes)

Die Bestimmung der prozentualen Anteile der Baustoffstruktur auf Grundlage der Rauminhalte kann im Vergleich beider Varianten als die besser geeignete eingeschätzt werden, da sie auf eindeutiger definierten Mengenaussagen basiert. Wird z. B. ein „Stück“ Fabrik- und

Werkstattgebäude betrachtet, so kann dieses hinsichtlich des Raumvolumens relativ groß, aber auch relativ klein sein. Ist hingegen von achttausend Kubikmetern Fabrik- und Werkstattgebäude die Rede, so hat man eine deutlich konkretere Vorstellung von der Kubatur bzw. der baulichen Physis dieses Gebäudes. Zur Beschreibung der baulichen Physis von Industrie- und Gewerbebauten sollte dementsprechend eher auf rauminhaltbezogene Daten zurückgegriffen werden. Auf Grund der Datenverfügbarkeit wird diese Variante jedoch eingeschränkt sein. Werden z. B. Daten aus den Statistischen Jahrbüchern für die Bundesrepublik Deutschland verwendet, sind nur Daten mit Gebäudebezug ausgewiesen (Abbildung 3-6). (Die Unterschiede zu den Werten der Abbildung 3-4 (Bundeswerte nach Fachserie 5/Reihe 1) ergeben sich durch leicht verschobene Betrachtungszeiträume.)

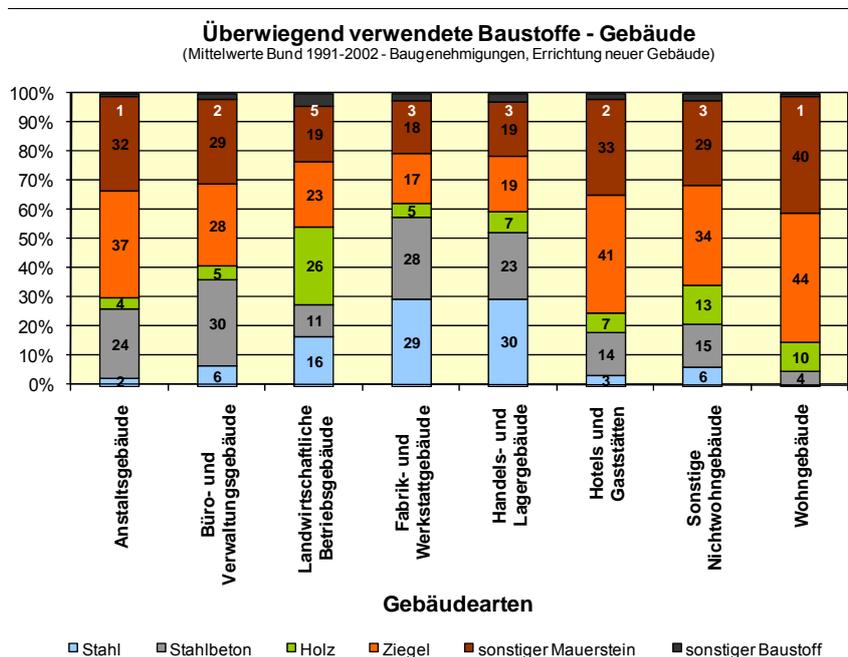


Abbildung 3-6: Baustoffanteile (Bezug: Gebäude) verschiedener Gebäudearten – Mittelwerte für den Bund (Datenquelle: Statistische Jahrbücher der Bundesrepublik Deutschland)

Die unterschiedlichen Ergebnisse zur Struktur der Anteile der überwiegend für die Tragkonstruktion verwendeten Baustoffe wurden im Rahmen des Bearbeiterteams diskutiert. Auf Grund des deutlich längeren Betrachtungszeitraumes (1991 bis 2002) wird auf die Daten der Statistischen Jahrbücher für die Bundesrepublik Deutschland zurückgegriffen. Sie werden (obwohl sie nur Gebäudebezug haben) in das Rechenmodell zur Kennzahlbildung für Gewerbegebäude integriert (Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Baustoffanteile (Bezug: Gebäude) verschiedener Gebäudearten – Mittelwerte für den Bund (Datenquelle: Statistische Jahrbücher der Bundesrepublik Deutschland)

Baugenehmigungen Errichtung neuer Gebäude Betrachteter Zeitraum: 1991 bis 2002	Überwiegend verwendeter Baustoff in Prozent [%]					
	Stahl	Stahlbeton	Holz	Ziegel	Sonstiger Mauerstein	Sonstiger Baustoff
Anstaltsgebäude	2	24	4	37	32	1
Büro- und Verwaltungsgebäude	6	30	5	28	29	2
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	16	11	26	23	19	5
Fabrik- und Werkstattgebäude	29	28	5	17	18	3
Handels- und Lagergebäude	30	23	7	19	19	3
Hotels und Gaststätten	3	14	7	41	33	2
Sonstige Nichtwohngebäude	6	15	13	34	29	3
Wohngebäude	0	4	10	44	40	1

Hinweis:
1992 kein Wert für Stahl bei Anstaltsgebäude, Jahr aus Mittelwertbildungen Stahl-Anstaltsgebäude herausgenommen!
1991, 1992 keine Werte für Sonstiger Baustoff bei Anstaltsgebäude, beide Jahre aus Mittelwertbildungen Sonstiger Baustoff-Anstaltsgebäude herausgenommen!

3.3.2 Hypothesen zum Verhältnis Konstruktionsvolumen zu Bruttorauminhalt

Konkrete Daten zum Konstruktionsvolumen sind in den Amtlichen Statistiken nicht ausgewiesen. Sie lassen sich nur unmittelbar auf Basis empirischer Untersuchungen zu Grundflächen und Volumen ableiten. Dabei wird angenommen, dass das Verhältnis von Konstruktionsvolumen zu Bruttovolumen (Bruttorauminhalt) gleich dem Verhältnis von Konstruktions-Grundfläche zu Brutto-Grundfläche (nach DIN 277) ist.

Dementsprechend ist das Konstruktionsvolumen die Summe der Volumen aller aufgehenden (vertikalen) sowie horizontal gelagerten Bauteile aller Grundrissebenen eines Bauwerkes, z. B. der Wände, Stützen, Pfeiler, Geschoss- und Zwischendecken.

Zur Bestimmung des Verhältnisses von Konstruktions-Grundfläche zu Brutto-Grundfläche wurden Auswertungen der BKI-Datenbank (BKI KOSTENplaner 11) genutzt. Die Untersuchungen zu Grund-Flächen und Volumen von Industrie- und Gewerbebauten belegen, dass deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Gebäudearten vorhanden sind (Abbildung 3-7).

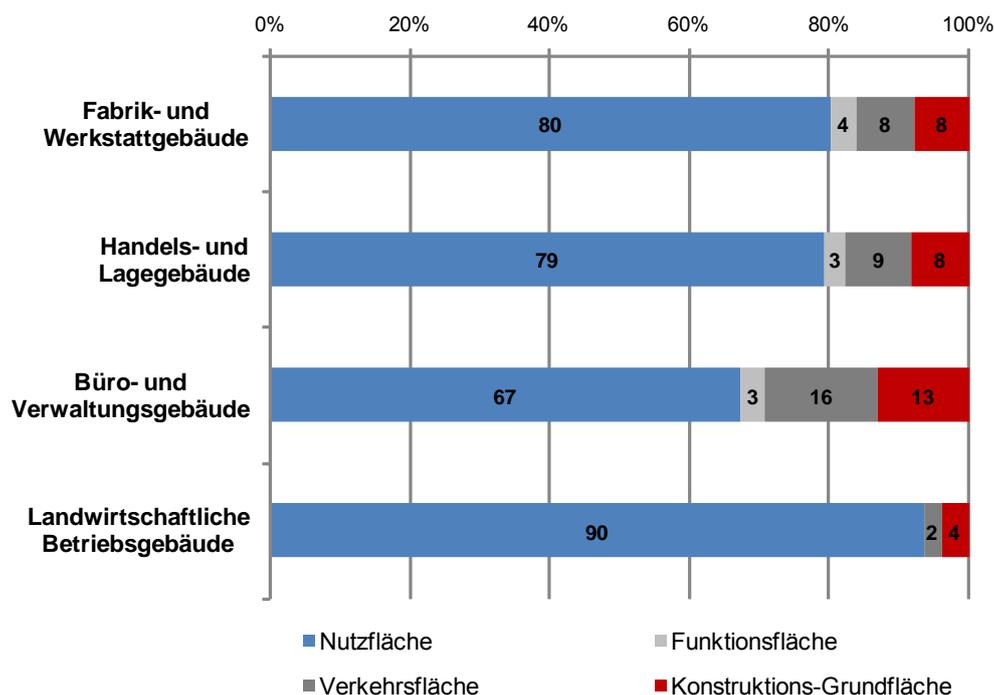


Abbildung 3-7: Flächenrelationen – Gebäudearten im Vergleich (BKI-Daten-Analyse von Gruhler und Böhm 2008b)

So haben die landwirtschaftlichen Betriebsgebäude mit durchschnittlich 4 % generell den geringsten Konstruktions-Grundflächen-Anteil. Die Fabrik- und Werkstatt- sowie die Handels- und Lagergebäude weisen mit ca. 8 % jeweils den gleichen Konstruktions-Grundflächen-Anteil auf. Für die Büro- und Verwaltungsgebäude wurde ein Anteil von durchschnittlich 13 % ermittelt. Sie haben damit einen Konstruktions-Grundflächen-Anteil, der in der Bandbreite der für Wohngebäude charakteristischen Werte liegt. Für Hotels und Gaststätten konnte bisher kein eigener durchschnittlicher Konstruktions-Grundflächen-Anteil ermittelt werden. Da jedoch Hotels und Gaststätten den Büro- und Verwaltungsbauten baulich-konstruktiv sehr ähnlich sind (Geschossbauten: Wandbauweise, Stahlbetonskelettbauweise), wird mit 14 % auch ein ähnlicher Wert angenommen (Tabelle 3-7).

Tabelle 3-7: Konstruktions-Grundflächen-Anteil unterschiedlicher Gebäudearten

Gebäudearten	Konstruktions-Grundflächen-Anteile in %
Anstaltsgebäude	14
Büro- und Verwaltungsgebäude	13
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	4
Fabrik- und Werkstattgebäude	8
Handels- und Lagergebäude	8
Hotels und Gaststätten	14

Der im Rahmen dieser Auswertungen pro Gebäudeart ermittelte Konstruktions-Grundflächen-Anteil wird mit dem Brutto-Volumen (Brutto-Rauminhalt) pro Gebäudeart ins Verhältnis gesetzt. Das Ergebnis sind Konstruktions-Volumen pro Gebäudeart (Abbildung 3-8).

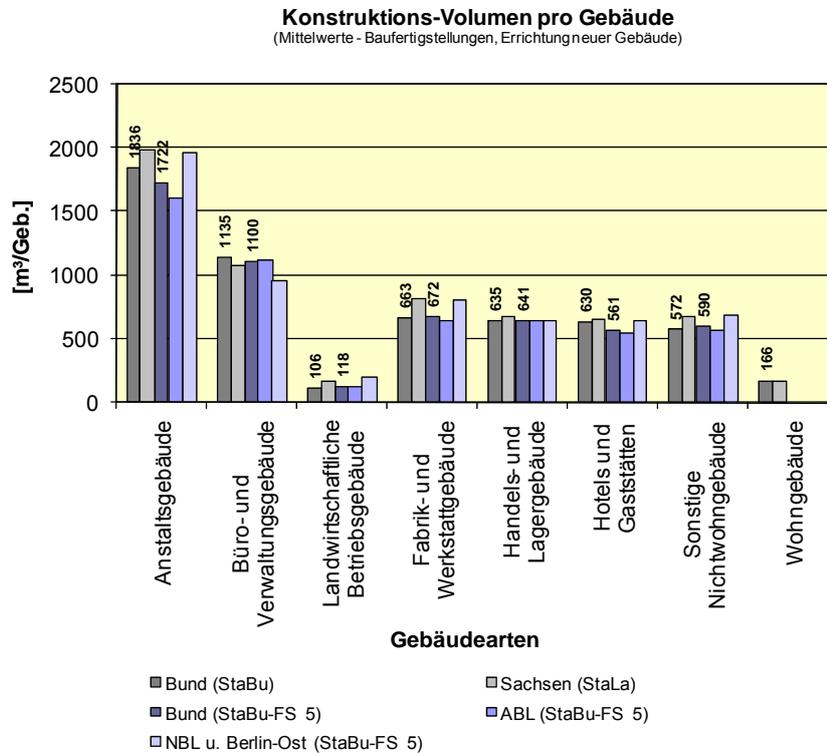


Abbildung 3-8: Konstruktionsvolumen pro Gebäude – Mittelwerte im Vergleich

Je nach Datenquelle (Statistische Jahrbücher für die Bundesrepublik Deutschland, Statistische Jahrbücher der Bundesländer, Fachserie 5/Reihe 1 „Bautätigkeit und Wohnen“ des Statistischen Bundesamtes) ergeben sich (auf Grund nicht identischer Betrachtungszeiträume) leicht differierende Werte (Tabelle 3-8).

Tabelle 3-8: Konstruktionsvolumen pro Gebäude – Mittelwerte im Vergleich

Gebäudearten	Konstruktions-Volumen pro Gebäude – Mittelwerte [m³/Geb.] Basis: Baufertigstellungen				
	Bund StaBu 1991 - 2004	Sachsen StaLa 1992 - 2005	Bund StaBu-FS 5 1997 - 2004	ABL StaBu-FS 5 1997 - 2004	NBL u. Berlin-Ost StaBu-FS 5 1997 - 2004
Anstaltsgebäude	1836	1979	1722	1606	1955
Büro- und Verwaltungsgebäude	1135	1068	1100	1120	957
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	106	159	118	114	196
Fabrik- und Werkstattgebäude	663	810	672	640	803
Handels- und Lagergebäude	635	673	641	638	641
Hotels und Gaststätten	630	653	561	538	638
Sonstige Nichtwohngebäude	572	669	583	581	596

3.3.3 Hypothesen zum Baustoff der Gesamtkonstruktion typischer Konstruktionsweisen

Um für die unterschiedlichen Nichtwohngebäudearten die Relationen zwischen tragender und nicht tragender Konstruktion einschätzen zu können, wurden Recherchen zu charakteristischen Konstruktionsweisen und Baustoffkombinationen vorgenommen. Dabei zeigten sich, wie schon bei den Flächenrelationen (vgl. Abschnitt 3.3.2), deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Gebäudearten.

Anstaltsgebäude werden häufig in Wandbauweise errichtet. Das Konstruktionsprinzip der Wandbauweise beruht darauf, dass die vertikalen und horizontalen Lasten durch tragende Wände und deren Fundamente in den Baugrund abgeleitet werden. Die tragenden Wände werden als massives Mauerwerk oder Wandbauplatten ausgebildet (Wenzel 1967). Damit prägen Ziegel und sonstige Mauersteine sowie Stahlbeton die Baustoffstruktur dieser Gebäudeart und sind die maßgeblichen Baustoffe der tragenden Konstruktion. Nicht tragende Baustoffe und Baustoffschichten sind Dämmschichten, Putze und verschiedenartige Verblendelemente.

Büro- und Verwaltungsgebäude werden meist mehrgeschossig errichtet. Typische Bauweisen sind die Schachtelbauweise, die Schottenbauweise oder Skelettbauweise (Wenzel 1967, Gottschalk 1994). Die Schachtel- und die Schottenbauweise sind Wandbauweisen bei denen die tragenden Wände als massives Mauerwerk oder Wandbauplatten ausgebildet werden. Die vorrangig verwendeten Baustoffe für die Tragkonstruktion sind damit Ziegel, sonstiger Mauerstein oder Stahlbeton. Bei der Skelettbauweise werden die vertikalen Lasten durch Stütze-Riegelkonstruktionen in den Baugrund abgeleitet. Die horizontale Lastverteilung erfolgt durch Geschossdecken und aussteifende Elemente. Als Baumaterialien der tragenden Konstruktion findet vorrangig Stahlbeton Anwendung. Die für Büro- und Verwaltungsbauten maßgebliche Konstruktionsweise ist die Massivbauweise. Die für die Tragkonstruktion eingesetzten Baustoffe sind vorrangig Ziegel, sonstige Mauersteine und Stahlbeton. Nicht tragende Konstruktionsteile sind vorrangig Putze und Dämmschichten, aber auch vorgeblendete Fassadenelemente (mit/ohne Hinterlüftung).

Bei den landwirtschaftlichen Betriebsgebäuden ist die Konstruktionsvielfalt sehr groß. Sie reicht von einfachen Bauten in massiver Wandbauweise über Stütze-Riegel-Konstruktionen aus Holz oder teilweise Stahlbeton bis hin zu Skelettbauten aus Stahl. Damit ist die Bandbreite der für die Tragkonstruktion verwendeten Baustoffe groß und anteilmäßig relativ ausgeglichen, wobei Holz zu einem hohen Anteil eingesetzt wird.

Fabrik- und Werkstattgebäude können je nach funktionalen Anforderungen als Geschossbauten, Hallenbauten oder Flachbauten errichtet sein (Henn 1955, Papke 1980). Geschossbauten sind dabei häufig Skelettbauten aus Stahl oder Stahlbeton. Hallenbauten sind aus einzelnen Bindern aufgebaut, die sich in beliebiger Anzahl zu Hallenschiffen aneinander reihen lassen. Hinsichtlich der verwendeten Baustoffe werden Holzhallen, Stahlbetonhallen und Stahlhallen unterschieden. Flachbauten sind in der Regel leichte und wirtschaftliche Konstruktionen, die große ebenerdige Arbeitsflächen bereitstellen. Sie lassen sich in Stahl oder Stahlbeton erstellen. Für eher kleinere Fabrik- und Werkstattgebäude findet auch die Wandbauweise aus Ziegel oder sonstigem Mauerstein Verwendung. Die vorrangig bei Fa-

brik- und Werkstattgebäuden eingesetzten Konstruktionsweisen sind damit der Stahlbau und der Stahlbetonbau, aber auch der massive Mauerwerksbau. Die Bandbreite der möglichen Baustoffe für die nicht tragenden Konstruktionsteile ist groß.

Handels- und Lagergebäude können wie die Fabrik- und Werkstattgebäude als Geschoss-, Hallen- oder Flachbauten errichtet sein. Damit sind auch die tragenden Konstruktionen ähnliche, wobei die Handels- und Lagerbauten in der Regel etwas geringere Gebäude- bzw. Raumhöhen aufweisen. Es finden auch annähernd die gleichen Baustoffe für die tragende Konstruktion Verwendung. Die Baustoffstruktur der Handels- und Lagerbauten ist damit der von Fabrik- und Werkstattgebäuden nahezu gleich.

Hotels und Gaststätten sind häufig Geschossbauten in vor allem Wandbauweise aus massivem Mauerwerk aber auch in Stahlbetonskelettbauweise (Wenzel 1967). Ziegel und sonstige Mauersteine prägen damit zum überwiegenden Teil die Baustoffstruktur der Hotels und Gaststätten. Die Baustoffstruktur dieser Gebäudeart ist der der Anstaltsgebäude relativ ähnlich.

Aus Anlage 5 sind die Ergebnisse der Recherche sowie des im Rahmen eines IÖR-Baufachexpertenworkshops geführten Diskurses zu den Konstruktionsweisen der verschiedenen Nichtwohngebäudearten dargestellt. Zusammenfassend sind die Anteile für die tragende und die nicht tragende Konstruktion für die vier maßgeblichen Konstruktionsweisen Massivbau, Stahlbetonbau, Holzbau und Stahlbau in Tabelle 3-9 aufgeführt.

Tabelle 3-9 Anteil der tragenden Konstruktionen an der Gesamtkonstruktion für typische Konstruktionsweisen – Schätzungen und Annahmen

Konstruktionsweise	Anteil tragende Konstruktion	Anteil nicht tragende Konstruktion
Massivbau	85 ... 95 %	5 ... 15 %
Holzbau	65 ... 75 %	25 ... 35 %
Stahlbau	2 ... 8 %	92 ... 98 %
Stahlbetonbau	75 ... 85 %	15 ... 25 %

Die in Tabelle 3-9 aufgeführten Annahmen machen die unterschiedlichen Anteile der tragenden Konstruktion an der Gesamtkonstruktion deutlich. Die höchsten Anteile liegen im Massiv- und Stahlbetonbau. Mit der Beschreibung des Baustoffs der tragenden Konstruktion ist der Baustoff des Großteils der Gesamtkonstruktion beschrieben. Das Gegenteil ist im Stahlbau der Fall, wo mit der baustofflichen Beschreibung der tragenden Konstruktion nur wenig über die stoffliche Zusammensetzung des Gesamtgebäudes bekannt ist.

Vor diesem Hintergrund werden für die hier anstehenden Modellierungsaufgaben vereinfachte Annahmen getroffen: Für den Massivbau und den Stahlbetonbau wird angenommen, dass sich der (mineralische) Baustoff der tragenden Konstruktion in der nichttragenden Konstruktion fortsetzt. Dabei werden Anteile von Mauersteinen und Betonbauteilen implizit mitberücksichtigt, die in nichttragenden Bauteilen anderer Konstruktionsweisen wie Holzbau und Stahlbau vorkommen. Bei diesen letztgenannten Konstruktionsweisen werden die Anteile

le an Betonbauteilen und Mauerwerk am Gesamtkonstruktionsvolumen deshalb auf „0“ gesetzt.

3.3.4 Hypothesen zur mittleren Dichte von Baustoffgruppen

Zur Umrechnung des Konstruktionsvolumens von Kubikmeter pro Nichtwohngebäude in Megatonnen pro Nichtwohngebäude muss für die Baustoffgruppen Stahl, Stahlbeton, Holz, Ziegel, sonstiger Mauerstein sowie sonstiger Baustoff eine durchschnittliche Dichte definiert werden. Stahl und Stahlbeton sind einzelne Baustoffe und keine Baustoffkombinationen, sodass mit der für sie ausgewiesenen Dichte gerechnet werden kann. Holz kann in unterschiedlichen Formen auftreten: Als Kanthölzer oder Bretter, als Schicht- oder Sperrholz, aber auch in Form von Spanplatten. Damit sind Schwankungen der Dichte in einer Bandbreite von 600 bis 800 kg/m³ möglich. Ähnlich verhält es sich bei den Ziegeln und sonstigen Mauersteinen. Ziegel können Klinker, normale Vollziegel oder Hochlochziegel sein, sodass die Dichte in einer Bandbreite von 1400 bis 2200 kg/m³ schwankt. Bei den sonstigen Mauersteinen reicht die Bandbreite von 600 bis 2000 kg/m³, dabei finden Kalksandsteine, Porenbetonsteine und Betonhohlblocksteine Berücksichtigung. Die Kategorie sonstiger Baustoff lässt sich bezüglich der Dichte kaum realistisch einschätzen. Das Spektrum der darin integrierten Baustoffe reicht von Sand, Kies, Faserzementplatten über Polystyrol, Mineralwolle bis hin zu Fliesen, Aluminium oder Glas. Die Bestimmung einer mittleren Dichte für diese Kategorie ist mit zu großen Unsicherheiten verbunden, sodass für sie kein Wert festgelegt wird. Für die übrigen Baustoffe und Baustoffgruppen hingegen wird den vorangegangenen Beschreibungen entsprechend jeweils eine mittlere Dichte definiert. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle dokumentiert (Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10: Geschätzte Dichten unterschiedlicher Hauptbaustoffe bzw. Baustoffgruppen

Baustoff	Stahl	Beton	Holz	Ziegel	Sonst. Mauerstein	Sonst. Baustoff
Mischdichte in kg/m ³	7800	2400	700	1800	1370	-

3.3.5 Resultierende Baustoffkennwerte nach Gebäudearten

Nachfolgende Tabellen zeigen das Ergebnis der Kennzahlenbildung für Gewerbegebäude.

Tabelle 3-11: Gebäudebezogene spezifische Baustoffkennwerte für Gewerbegebäude

Gebäudetypen	Baustoff	
	Beton Mg/Geb.	Ziegel Mg/Geb.
Anstaltsgebäude	954	954
Büro- und Verwaltungsgebäude	777	489
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	41	42
Fabrik- und Werkstattgebäude	474	196
Handels- und Lagergebäude	358	203
Hotels und Gaststätten	214	377

Im Modell kommen die in Tabelle 3-12 zusammengefassten demografiebezogenen Kennzahlen zur Anwendung. Diese werden aus der Verknüpfung der in Tabelle 3-11 aufgeführten gebäudebezogenen Kennzahlen mit den in Abschnitt 2.3.2, Tabelle 2-11 dargestellten spezifischen Entwicklungskennziffern zur Abbildung von Veränderungen im Gewerbebaubestand gebildet.

Tabelle 3-12: spezifische Baustoffkennwerte für Gewerbegebäude

Gebäudetypen	Erwerbspersonen, t/(1000 EP*a)				Einwohner, t/(1000 EW*a)			
	Zugang		Abgang		Zugang		Abgang	
	Beton	Ziegel	Beton	Ziegel	Beton	Ziegel	Beton	Ziegel
Anstaltsgebäude	14,0	14,0	14,0	14,0	5,7	5,7	4,8	4,8
Büro- und Verwaltungsgebäude	79,8	26,9	50,2	16,9	30,3	19,1	10,9	6,8
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	11,3	6,6	11,6	6,7	4,3	4,4	2,5	2,6
Fabrik- und Werkstattgebäude	84,0	39,1	34,7	16,2	31,7	13,1	15,2	6,3
Handels- und Lagergebäude	103,7	33,0	58,7	18,7	39,4	22,3	12,9	7,3
Hotels und Gaststätten	5,1	2,9	9,1	5,0	1,9	3,4	1,1	1,9

4 Potenzielle RC-Stoffströme

Um die maximale Substitution von Primärrohstoff durch das Recycling von mineralischem Bauabfallmaterial und die sich daran knüpfende Ressourcenschonung abbilden zu können, sind die modellierten Baustoffströme in Rezyklatströme zu transformieren. Mit diesem Schritt wird die Erzeugung mineralischer Baustoffzyklate aus den anfallenden Abbruchmaterialien und mögliche Nutzung dieser Rezyklate durch die Baustoffindustrie nachvollzogen und somit der unmittelbare Bezug zur Praxis von Bauabfallaufbereitung und -verwertung hergestellt.

Den hauptsächlichen Betrachtungsgegenstand bilden dabei zwei Vorgänge, an die sich die Gewinnung von Betonzuschlagstoff aus Sekundärmaterial im Wesentlichen koppelt. Dies sind der Gebäudeabbruch bzw. -rückbau als der Vorgang, durch den die mineralischen Baustoffe aus dem Baustofflager des Gebäudebestandes freigesetzt werden und die Ausschuttauufbereitung als der Vorgang, der aus dem freigesetzten Material Sekundärbaustoffe mit den entsprechend benötigten Eigenschaften erzeugt.

Die im Modell errechneten bereitstellbaren Mengen an einsatzfähigen RC-Zuschlagsstoffen bilden diese Vorgänge quantitativ ab. Diesen werden die tatsächlich in den Baubestand einbringbaren Mengen gegenübergestellt. Aus dem Verhältnis beider Mengenströme zueinander lässt sich die mögliche Substitution von Primärrohstoffen ableiten. Entlang der Kausalkette, wonach nur aufbereitet werden kann, was vorher entsprechend erfasst wurde, und nur zum Einsatz kommen kann, was entsprechend der technischen Vorgaben aufbereitet wurde, liegt der Ausgangspunkt der Mengentrombetrachtungen bei den Bauabfallstoffen, die der Aufbereitung zu Betonzuschlagstoff zugeführt werden können.

In der Praxis unterliegen alle Teilströme hinsichtlich ihrer Ausprägung einer Beeinflussung durch unterschiedlichste Faktoren, in denen sich insbesondere die Gegebenheiten des jeweiligen Marktes aber auch andere Sachverhalte, wie bspw. das Vorhandensein bestimmter Ressentiments, Erfahrungspotenziale oder Innovationsbestrebungen widerspiegeln können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist eine umfassende Abbildung und Berücksichtigung dieser im regionalisierten Kontext zu sehenden Aspekte bei der Modellerstellung nicht leistbar. Gleichwohl sollen Einflussgrößen wesentlicher Art im Folgenden angesprochen und hinsichtlich möglicher Wirkungsrichtungen beleuchtet werden. Die Ausführungen hierzu erfolgen im Zusammenhang mit den drei letztlich in das Modell eingebrachten Rechenkomponenten. Mittels dieser werden die zu betrachtenden Teilabschnitte Abbruch, Aufbereitung und Wiedereinsatz im Modell reflektiert und die daraus resultierenden RC-Teilmengeströme zur Abbildung gebracht.

Die verbale Charakterisierung der jeweiligen Rechenkomponenten geschieht durch Benennung jener Sachverhalte, die das Hauptaugenmerk der kalkulatorischen Abbildung und somit die wesentlichen Bezugspunkte für die RC-Stoffstrommodellierung bilden. Damit verbunden ist auch der Verweis auf Praxisvorgänge, durch die der Stoffkreislauf des Betonrecyclings ungeachtet vom regionalisierten Betrachtungsansatz die größten Einschränkungen seiner Massebilanz erfährt. Es handelt sich dabei um die *Erfassbarkeit* des zur Aufbereitung als Betonzuschlagstoff geeigneten Materials im Zuge des Gebäudeabrisses, um die *Ausschleusung* eines bestimmten Stoffanteils im Zuge der Aufbereitung und die *beschränkte Zulässigkeit*

keit von RC-Zuschlag in Betonanwendungen. In den folgenden drei Kapitelpunkten finden die genannten Sachverhalte und damit grundlegende Einflussgrößen innerhalb der entsprechenden Rechenkomponenten nähere Erläuterung.

4.1 Erfassbarkeit

Die Entscheidung zur teilweisen Entfernung von Bauwerkssubstanz oder zum Totalabbruch und ihre praktische Umsetzung stellen den ersten Schritt bei der Gewinnung von Bauabfällen und im Umgang damit dar. Dabei bestimmen das konkrete Objekt, das Abbruchziel sowie das Abbruchvorgehen, in welcher Form welche Materialien zur Freisetzung kommen.

Üblicherweise fallen die in den Gebäudebestand eingebrachten Baustoffe als Bauabfälle in verschiedenen Fraktionen an. Eine Benennung dieser Fraktionen erfolgt im Europäischen Abfallverzeichnis unter der Abfallschlüsselnummer 17. Im Fokus der vorliegenden Betrachtungen zum Ressourcenschonungspotenzial stehen die in der als Bauschutt bezeichneten Gesamtfraktion⁴² enthaltenen Materialfraktionen Beton und Ziegel. Wie später noch ausgeführt wird, bilden diese Materialien die mengenrelevanten Bestandteile der als Betonzuschlag nutzbaren rezyklierten Gesteinskörnungen (RC-GK). Je nach Gebäudetyp bestehen die Bauwerkssubstanz und damit die bei einem Abbruch freiwerdenden Baurestmassen in Deutschland gegenwärtig zu rd. 60 bis über 90 % aus diesen beiden Stoffgruppen (siehe u. a. Technische Hochschule Darmstadt, 1998, INTECUS GmbH, 1999). Trotz des hohen Anteils an der Bausubstanz stellen jedoch die diffuse Verteilung in den Bauwerken, sowie die Heterogenität, welche sowohl innerhalb der jeweiligen Stoffgruppe selbst (bspw. Leichtbeton, Estrichbeton, Normalbeton) als auch aufgrund oftmals bestehender Materialverzahnung gegeben ist, eine besondere Problematik für die Erzeugung separater Stoffströme dar.

Eingedenk technischer und ökonomischer Möglichkeiten der Aufbereitung ist die Sortenreinheit des erfassten Abfallmaterials für eine hochwertige Verwertung als RC-GK eine Grundanforderung. Im Stoffstrommodell werden die abgehenden Baustoffströme der Fraktionen Beton und Ziegel jeweils als Gesamtmasse angegeben. Real treten diese Fraktionen mehr oder weniger vermischt mit anderen Fraktionen auf. Bei der Stoffflussmodellierung wird diesem Umstand mittels der Rechenkomponente 'Erfassbarkeit' Rechnung getragen.

Eine möglichst sortenreine Erfassung der im Hochbau verbauten Materialfraktionen lässt sich - unabhängig von der verfügbaren Abbruchtechnik - nur durch einen selektiven Abbruch erreichen. Dies wird im Baualltag auch zunehmend praktiziert⁴³. Ein solches Vorgehen entspricht unmittelbar den bestehenden Forderungen des KrW-/AbfG und der GewAbfV zur weitgehenden Getrennthaltung und Erfassung von verschiedenen Abfallstoffen am Entstehungsort. Für einen entsprechend gestalteten Abbruchprozess ist es notwendig, mit einer Gebäudeentkernung und gegebenenfalls Schadstoffentnahme zu beginnen, und mit einer fraktionierten Demontage des Bauwerkskörpers fortzusetzen. Auf diese Weise kann die qualitative Beschaffenheit der anfallenden Abfallmassen hinsichtlich ihrer jeweiligen Zusam-

⁴² Fraktionen unter Schlüsselnummer 17 01 des Europäischen Abfallverzeichnisses

⁴³ Neben der hier herausgestellten Bedeutung des selektiven Rückbaus im Rahmen der Gewinnung hochwertiger RC-Baustoffe wird diese Form der Abbruchgestaltung auch aufgrund erzielbarer Entsorgungersparnisse für stofflich getrennte Bauabfallstoffe sowie des zunehmenden Agierens innerhalb des Bestandes immer wichtiger.

mensetzung und des darin befindlichen Schadstoffpotenzials gezielt beeinflusst werden. Mit Gebäudeabbrüchen, denen nach Entnahme der weitgehend beweglichen Installationen wie Türen, Fenster, Ver- und Entsorgungsmedien in klassischer Weise der Gesamtabriss des Gesamtgebäudekörpers auf mechanischem Weg oder sogar durch Sprengung folgt, ist dies nicht erreichbar. Hier ergibt sich die Notwendigkeit zur nachträglichen Aussortierung der für ein Recycling geeigneten Materialien mit dem Ergebnis, dass technisch bedingt höhere Unreinheiten bestehen bleiben, aus denen Verwertungseinschränkungen hervorgehen. Liegen auch Schadstoffbelastungen vor, ist deren Verfrachtung in die gesamte Abbruchmasse nicht auszuschließen, was im Ergebnis eine generelle Unverwertbarkeit zur Folge haben kann. Schon allein der Verdacht auf Schadstoffbelastungen reicht aus, dass Rezyklate ihre Akzeptanz für sensible Anwendungsbereiche, wie z. B. dem Betonbau, verlieren.

Untermauerung erfahren diese Aussagen nicht nur durch die später folgenden Ausführungen zur notwendigen Materialreinheit der RC-GK für Betonzuschlag, sondern auch durch die Tatsache der zunehmenden Heterogenität des Baustoffeinsatzes im Hochbau. So handelt es sich bei den derzeit zum Abbruch gelangenden Gebäuden um Bausubstanz, die vorwiegend um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts und davor errichtet wurde und damit ein Spektrum darin eingesetzter Baustoffe aufweist, welches eine Trennung der unterschiedlichen Materialien noch relativ gut zulässt. Diese Situation ändert sich zusehends in Richtung einer vielgestaltigeren baustofflichen Gebäudezusammensetzung (UBA 2008b). Als eine besondere Problematik deuten sich vor allem Materialverbunde und der Einsatz von chemischen Bauzusatzstoffen, verschiedenen Klebern und Kunststoffen sowie der stark gewachsene Anteil von Leichtbaustoffen auf Gipsbasis an. So geht beispielsweise aus Untersuchungen der TU Wien (2007) hervor, dass die Verbräuche an Gips beim Baugeschehen speziell in den letzten Jahrzehnten drastisch angewachsen sind, was in einer Verdoppelung der Gipsmasse in Bauwerken innerhalb einer Zeitspanne von nur etwa 10 Jahren zum Ausdruck kommt. Der übergroße Teil der eingesetzten Gipsbaustoffe ist dabei vor allem im Wohnungsbau konzentriert, wo unter anderem Gipsbau- und Gipskartonplatten eine große Rolle spielen. Durch deren überwiegende Benutzung zur Errichtung von nichttragenden Innenwandkonstruktionen, Zwischendecken und Schächten sind zwar gute Möglichkeiten eines separaten Ausbaus im Zuge von Abbruchmaßnahmen gegeben, allerdings besteht auch die Gefahr der Vermischung mit den klassischen Mineralbaustoffen wie Beton bei unselektivem Vorgehen. Gipsverunreinigungen im durch Abbruch gewonnenen Betonbruch stellen eine wesentliche Ausschlusskomponente für dessen Wiedereinbringung als Betonzuschlagstoff dar. Eine ähnliche Problematik bilden auch bestimmte synthetische Kleb- und Dichtungstoffe, die insbesondere bei Betonfertigteiltbauten von Bedeutung geworden sind und hier teilweise Verunreinigungen - oder diffusionsbedingt - sogar auch Schadstoffgehalte verursachen, durch die auch der mineralische Baustoff für eine Verwendung im Hochbau ausgeschlossen werden muss.

An den aufgeführten Beispiele macht sich deutlich, dass es zusätzlich zur Notwendigkeit des selektiven Rückbaus zugleich erheblicher Anpassungen und Anstrengungen beim Einsatz geeigneter Trenn- und Sortiertechniken bedarf, um die stoffliche Verwertbarkeit der masserelevanten mineralischen Grundbaustoffe auch zukünftig gewährleisten zu können. Auch wenn der selektive Rückbau aus Gründen der erzielbaren Sortenreinheit das gewählte Verfahren

ist, mit welchem Recyclingbaustoffe zukünftig aus dem Gebäudebestand gewonnen werden sollen, stellt dieses jedoch keineswegs die vollständige Erfassung der entsprechenden Materialien sicher. So setzt die Nutzung von Beton-Abrissmaterial als rezyklierter Baustoff auch voraus, dass dieses nicht nur kontaminationsfrei ist, sondern auch ohne die Gefahr gesundheitlicher Risiken geborgen und weiterverarbeitet werden kann. Dies stellt außer an Materialzusammensetzung und -zustand auch besondere Anforderungen an die technischen Berge- und Erfassungsvorgänge (s. Ausführungen unten).

Als mengenmäßig bedeutendes Beispiel sind unter dem Aspekt der Materialzusammensetzung dabei die Wohnungsbestände, welche in den 1970er und -80er Jahren im Gebiet der neuen Bundesländer in der Fertigteiltbauweise der Bauserien QP 71, P2 und WBS 70 errichtet wurden, hervorzuheben. Nach Meyer (2008) liegt allein der Anteil der Bauformen P2 und WBS 70 im Bereich der neuen Bundesländer bei knapp 70 % des Gesamtbestandes an Geschosswohnungsbauten in Plattenbauweise. Die dabei verwandten Betonteile enthalten unter anderem in den Dachdampeln, Außenwandplatten und teils in den Fußböden oft künstliche Mineralfasern mit der Bezeichnung Kamilit oder verkürzt KMF (Freistaat Sachsen, 2004). Diese Fasern gelten als krebserzeugend, weshalb Abbruchmaterial mit Gehalten an diesen Fasern als gefährlicher Abfall⁴⁴ einzustufen und damit gesondert zu behandeln und zu entsorgen ist. Gleiches gilt z. B. auch für asbesthaltige Betonbauteile.

Innerhalb der Stoffgruppe Ziegel sind bezogen auf die Erfassungsmenge für Betonzuschlag aufgrund unterschiedlicher Materialeigenschaften bei den Ziegelprodukten signifikante Abzüge zu berücksichtigen. Ausschlaggebend hierbei sind die Materialanforderungen an die zulässigen GK-Liefertypen nach DIN 4226-100. So ist bei Mauerziegeln (z. B. Hochloch-, Vollziegel) ein beachtlicher Anteil der verwendeten Produkte von porosierter Qualität. Damit liegt eine für Betonzuschlagsstoffe ungünstige Materialbeschaffenheit vor (insbesondere bezogen auf Dichte und Saugverhalten), welche deren Verwendung für zulässige Gesteinslieferkörnungen weitgehend ausschließt. Der aus den Ziegelbaustoffen für die Erfassung als Betonzuschlag in Betracht kommende Mengenteil umfasst somit insbesondere die nicht porosierten bzw. auch hartgebrannten Ziegel, also Dachziegel und Klinker. Von Vorteil erweist sich, dass die Verbauorte dieser Ziegel (z. B. Dächer) für den Abbruchprozess meist gut zugänglich sind und mit geringen Materialvermengungen in Verbindung stehen. Hierdurch bestehen für den getrennten Ausbau und die sortenreine Erfassung wiederum günstige Voraussetzungen.

Hinsichtlich der Berge- und Erfassungsvorgänge gilt den Aspekten der Arbeitssicherheit und des Schutzes der Unversehrtheit der eingesetzten Arbeitskräfte und -technik beim Rückbau besondere Aufmerksamkeit. Durch den Verbauort der verschiedenen Materialien im Gebäude sowie deren individuellen Zustand bestimmen sich die Zugriffsfähigkeit während des Rückbaus und Erfassbarkeit als sortenreine Fraktion. So können Anteile einer Stoffgruppe in Baugruppen und an Stellen im Gebäude festgelegt sein, die den separaten Zugriff und Ausbau unmöglich machen, so dass deren Erfassung erst nach dem Komplettabriss und dann zumeist nur noch in Vermischung mit anderen Baumaterialien erfolgen kann. Ausschlagge-

⁴⁴ AS 17 01 06* „Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten“

bend hierbei ist, dass Abbruchprozesse, gerade wenn sie die selektive Entnahme von Baumaterialien oder eine schrittweise Demontage einbeziehen sollen, in jedem Falle unter Ausschluss der Überlastung von tragenden Bauteilen und damit ohne Gefährdung der Standsicherheit des Restgebäudekörpers durchgeführt werden müssen. Zustandsbedingt wird die getrennte Aus- bzw. Abbaufähigkeit insbesondere dann eingeschränkt, wenn sich bspw. durch fortgeschrittenen Verfall oder andere Ursachen (z. B. Korrosion, Verschleiß) die Festigkeit von Bauwerksteilen als nicht hinreichend erweist, um die Entnahme ohne die Gefahr unkontrollierbarer Zerfallsrisiken durchzuführen. Dass dies einen Problembereich anschnitten wird durch die Tatsache der gegenüber anderen Bauaktivitäten deutlich höheren Unfallhäufigkeit im Abbruchgewerbe, bei der der Rückbau die Spitzenstellung hält, belegt. Eine unmittelbare Entschärfung dieses Problems ist natürlicherweise nur unter Verzicht auf eine höchstmögliche Trennschärfe bei der Abbruchdurchführung zu erreichen.

Unerlässliche Hilfsmittel sind daher moderne Technologien für den selektiven Abbruch, die z. B. in Form von High-Lift- (Arbeitshöhen von > 20 m) und Longfront-Technik (Arbeitshöhen von > 50 - 80 m) mit Abgreifern sowie durch den Einsatz von Abbruchrobotern, Mini- oder auch Microbaggern schon heute vereinzelt zur Anwendung gelangen (s. Abbildung 4-2). Ihre Bedeutung für einen recyclinggerechten Abbruch wird weiter wachsen. Gleiches gilt für intelligente recyclingorientierte Konzepte für Abbruchtätigkeiten im Bestand. Als aktuelles Beispiel ist hier das Bauvorhaben Doppeltürme der Deutschen Bank Zentrale Frankfurt a. Main erwähnenswert. Bei diesem Projekt erfolgt die Gebäudeentkernung mit einer parallelen Sortierung des Bauschutts direkt am Abbruchort, d.h. in den jeweiligen Etagen. Durch den Einsatz angepasster, fahrstuhlgängiger Rollcontainer zum Abtransport der Bauabfälle lässt sich eine hohe Trennschärfe der einzelnen Stofffraktionen sowie ein wendeltreppenartiges Vorgehen von oben nach unten realisieren. Eine im Rahmen dieses genannten Bauprojektes mit verfolgte Zielstellung ist die Erlangung des Gütesiegels der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Hölz, Hagge 2009).

Eine nicht zu vernachlässigende Konsequenz des Einsatzes von Spezialtechnik und gebäudespezifischem Vorgehen bilden die damit einhergehenden Kosten. Wie schon durch verschiedene Studien belegt (siehe u. a. Silbe, K. 1999, INTECUS GmbH, 1999) schneidet das Vorgehen des selektiven Rückbaus mit hoher Trenntiefe in der kostenorientierten Gesamtbilanzierung verglichen mit konventionellen Abrissverfahren in aller Regel schlechter ab. Eingesparte Entsorgungskosten und mögliche Verwertungserlöse können nur selten den erhöhten Aufwand an Zeit-, Mensch- und Technikeinsatz sowie an zusätzlichen Planungserfordernissen, der im Bereich von um ca. 10 % der Gesamtdurchführungskosten liegt, vollständig kompensieren (s. Abbildung 4-1). In der Praxis sind bei gegebenen Rahmenbedingungen von dieser Seite also eher Zugeständnisse an die Ausgestaltung und Trennintensität des Abbruchs zu erwarten, um durch eine optimierte Abbruchführung die Balance zwischen Wirtschaftlichkeit und möglichst hochwertiger Rohstoffrückgewinnung wahren zu können.

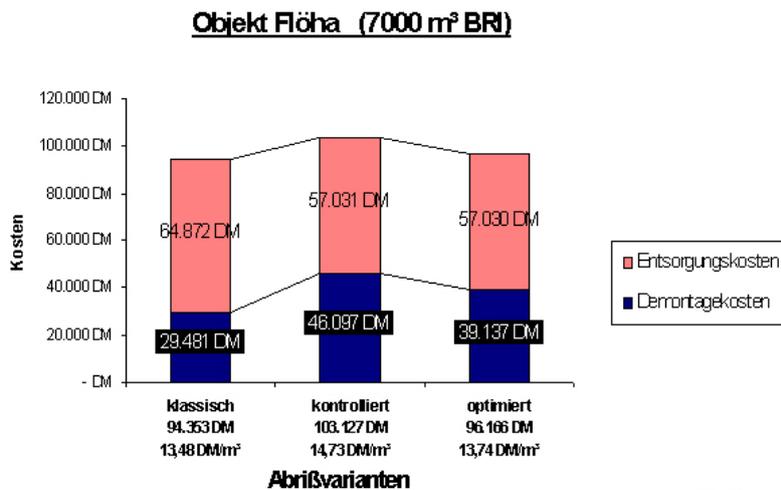


Abbildung 4-1: Kostenveränderung bei Anwendung unterschiedlich geführter Abbruchverfahren an einem Gebäudebeispiel (Quelle: INTECUS 1999)



Abbildung 4-2: Einsatz von High-Lift Technik für den Gebäuderückbau

Ein ebenfalls zu betrachtender Sachverhalt ist die Machbarkeit der Getrennthaltung verschiedener Baumaterialien. Hierzu sind nicht nur ein gut geschultes und sich regel- bzw. anweisungskonform verhaltendes Personal erforderlich, sondern auch entsprechende Flächen und eine adäquate Logistik beim Abbruch vorzuhalten. Gerade beim zukünftig verstärkt in Aussicht stehenden Bauen im Gebäudebestand werden sich dabei erhebliche Herausforderungen ergeben. Wo es nicht möglich ist, diesen in vollem Umfang zu begegnen, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass bestimmte Mengen eigentlich getrennt haltbaren Baumaterials, sei es durch Fehlzuzuweisung (Aufgabe in den "falschen" Container), logistische Engpässe (fehlender Platz für mehrfache Containergestellung) oder andere Zwänge (z. B. für eine separate Entsorgung unzureichende Kleinstmengen) nicht in den gewünschten Verwertungsstrom gelangen.

Der Sachverhalt der Erfassbarkeit des mineralischen Baumaterials zum Zwecke der Bereitstellung als Sekundärrohstoff für eine spezielle Verwertungsoption und die Berücksichtigung dieser Komponente im Stoffstrommodell stellt sich im Hinblick auf die angesprochenen Aspekte als wichtig heraus. Die hierfür zu treffenden Modellannahmen bezüglich der Erfassungsquote (s. Abschnitt 5.2) können angesichts der hierzu vorhandenen Datenlage und Individualität baulicher Situationen nur einen über fachliche Erfahrungen gebildeten Schätzwert darstellen. Mit der angenommenen Erfassungsquote soll demnach zum Ausdruck gebracht werden, dass, gemessen am Gesamtvorkommen eines Materials im Bauwerk, ein Teil dieses Materials auch bei maximal selektivem Vorgehen im Erfassungsprozess für einen bestimmten Verwertungszweck verloren geht und demzufolge dieser Verwertung abgerechnet werden muss. Wie ausgeführt, handelt es sich dabei vorrangig um ein objekt- und verfahrenstechnisch bedingtes Quantum an nicht erfassbarem Material, kontaminationsbedingte Ausschlüsse und Verluste bei der Erfassung in Einzelfractionen.

4.2 Ausschleusung

Die zur Herstellung von Beton zum Einsatz kommenden Stoffe bzw. stofflichen Komponenten haben gezielte Funktionen zu erfüllen, wodurch eine beliebige Substituierbarkeit der einzelnen Komponenten nicht gegeben ist. Beton besteht in seinen Grundbestandteilen aus einem Gemisch aus Zement, Gesteinskörnung bzw. mineralischem Zuschlag und Wasser. Er kann außerdem Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel enthalten. Der Stoffanteil, auf den sich das Untersuchungsvorhaben konzentriert, sind die Gesteinskörnungen, bei denen potenziell die Möglichkeit besteht, statt natürlich vorkommender Rohstoffe (Sand, Kies bzw. Splitt) mineralische Rezyklate einzusetzen. Der von Gesteinskörnungen gebildete Anteil liegt bei ungefähr drei Viertel des Gesamtvolumens des Betonendproduktes (Heidelberg Cement 2009, Jeske, U. et al. 2004).

Beim Vorgang der Betonherstellung härtet durch Hydratation die als Zementleim bezeichnete Mischung aus Zement und Wasser aus und bildet den sogenannten Zementstein. Da die als Zuschlag eingebrachten Gesteinskörner im Normalfall über eine weitaus höhere Festigkeit als der Zementstein verfügen, übernehmen sie im Beton die Funktion des Stützgerüsts. Günstig beschaffene, also eher grobkörnig und leicht raue Körnungen, bewirken höhere Betonfestigkeiten als Gesteinsmischungen, die feinkörnig bzw. sandreich und von glatten oder plattigen Konformen geprägt sind. Insbesondere müssen die Gesteinskörnungen für die Betonherstellung aber frei von Stoffen sein, die die Erhärtung und Beständigkeit des Betons beeinträchtigen können.

Um als Zuschlag für Beton eingesetzt und in dieser Form auch vermarktet werden zu können, müssen Gesteinskörnungen also prinzipiell bestimmte Eigenschaften aufweisen. Diese Eigenschaften sind durch Normen geregelt, wobei sich die Normung auf geometrische, physikalische und chemische Anforderungen bezieht (s. Tabelle 4-1). Zur gewerblichen Verwendung von Gesteinskörnungen in Deutschland muss der Nachweis erbracht werden, dass die Gesteinskörnungen den Anforderungen der europäischen Norm genügen (Konformitätsnachweis). Seit 01.06.2004 werden die Eigenschaften von Gesteinskörnungen für Normalbeton durch DIN EN 12620 (Gesteinskörnungen für Beton) in Verbindung mit der nationalen Anwendungsnorm DIN V 20000-103 geregelt (DIN EN 12620:2003-04 / EN 12620:2002+A1).

Tabelle 4-1: Im Normenwerk (DIN EN 12620 und DIN 1045-2) festgelegte Anforderungen an Gesteinskörnungen

Anforderungen	geregelt Eigenschaften
geometrische	Korngruppe; Kornzusammensetzung; Kornform; Feinanteile
chemische	Gehalt an wasserlöslichen Chloridionen; Gehalt an säurelöslichem Sulfat; Gesamtschwefelgehalt
physikalische	Widerstand gegen Zertrümmerung; Verschleißwiderstand*; Polierwiderstand*; Abriebwiderstand*; Frost- und Frost-Tausalzwiderstand
sonstige	Anteile erstarrungs- und erhärtungsstörender Stoffe; Anteile leichtgewichtiger organischer Verunreinigungen; Muschelschalengehalt*

**bei groben Gesteinskörnungen*

Die Vorgaben der Norm sind als Regelanforderungen zu verstehen, die im Grundsatz sowohl für natürliche als auch für aus Rezyklat gewonnene Gesteinskörnungen gelten. Zur genaueren Spezifizierung der Anforderungen für rezyklierte Gesteinskörnungen existiert seit 2002

zusätzlich die Norm DIN 4226-100 (Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen). In dieser Norm sind unter anderem die stofflichen Zusammensetzungen von vier Gesteinskörnungstypen einschließlich der für sie geltenden Regelanforderungen sowie grundsätzlicher Anforderungen an Rohdichte und Wasseraufnahme festgelegt. Die hierzu erforderliche Konformitätsprüfung sieht mehrere Schritte vor, die in Form verschiedener Prüfvorgänge beim Hersteller und eines extern geführten Zertifizierungsprozesses durchlaufen werden. Mittels CE-Prüfzeichen und entsprechend im Lieferdokument enthaltenen Eigenschaftsangaben wird dem Anwender der Gesteinskörnungen die Prüfung zur Kenntnis gegeben. Für rezyklierte Gesteinskörnungen spielen neben den europäischen Vorgaben die spezifischen Anforderungen der vorgenannten Normen eine wichtige Rolle. Für deren Erfüllung ist der Nachweis nach den bestehenden Regeln am Ort der Verwendung zu führen. Der Übereinstimmungsnachweis hierüber wird formal unabhängig vom CE-Zeichen geführt (s. Bundesvereinigung Recycling-Baustoffe e.V. 2005).

Die Erzeugung von RC-Gesteinskörnungen aus mineralischem Bauabfall findet in der dem Gebäudeabbruch folgenden Bauabfallaufbereitung statt. Die Aufbereitung des beim Abbruch erfassten Mengenstroms relevanter Bauabfallstoffe bildet somit die nächstfolgende Betrachtungsebene im Berechnungsmodell. Hier ist rechnerisch abzubilden, wie sich der RC-Stoffstrom aus der Erfassung durch die Aufbereitung zu geeigneten Gesteinskörnungen verändert.

Obwohl chemische und physikalische Anforderungen für die Betonherstellung von erheblicher Bedeutung und daher in der Normenfestsetzung der geeigneten rezyklierten Gesteinskörnungen verankert sind (s. Verein Deutscher Zementwerke 1998-2006), konzentriert sich der Prozess der Aufbereitung vor allem auf eine Bearbeitung des Abbruchmaterials über die Materialgeometrie. Den Hauptgrund hierfür liefert die Aufbereitungstechnik, welche derzeit im Wesentlichen auf die Veränderung von Korngrößenquerschnitt und Korngrößenhäufigkeit ausgelegt ist, aber großtechnisch über wenige Möglichkeiten zur Herbeiführung einer stofflichen Trennung verfügt⁴⁵. Dabei ist, selbst bei hoher Trennschärfe von Beton und Mauerwerk, für die im Wohngebäudeabbruch gewonnenen mineralischen Bauabfälle die Vermengung dieser Materialfraktionen mit Gips, etwa in Form von Gipsputz oder Stuck, aufgrund der heutigen Bautrends zunehmend auch mit Anhydritestrich, charakteristisch. Bei Ausbaumaterialien liegt der Anteil gipshaltiger Produkte inzwischen bei knapp einem Viertel des insgesamt anfallenden Bauschutts, und eine steigende Tendenz wird prognostiziert (Andrä, H.-P. et al. 1995).

Schwefelhaltige Stoffe, darunter Gips und Anhydrit, sind Auslöser von Treiberscheinungen im erhärtenden Beton oder zersetzen sich zu betonzerstörenden Verbindungen. Chloride, wie auch Nitrate und einige Halogenide wirken korrodierend und können beispielsweise über Betonanteile, die bestimmten Expositionen (Einfluss von Auftau- oder Imprägniermitteln, Baureinigen, Brandereignissen, Bodenfeuchte) unterlagen, in das Aufbereitungsgut eingetragen werden (Breit, W. (Online-Quelle)). Humusartige Substanzen und Stoffe mit zuckerähnlichen Eigenschaften beeinträchtigen oder verhindern bereits in geringer Menge das Erstarren und Erhärten des Zementes. Quellfähige Substanzen, wie z. B. Holz,

⁴⁵ Expertenworkshop zum vorliegenden Projekt am 29.04.09 beim Umweltbundesamt

können hingegen Verfärbungen oder Absprengungen vom Beton bewirken (s. Verein Deutscher Zementwerke 1998-2006).

Um auch hinsichtlich der chemisch-physikalischen Eigenschaften Sicherheit zu haben, müssen Aufbereiter auf möglichst unvermischte und „saubere“ Materialfraktionen zugreifen. Daher ist die Stofftrennung im Zuge des Abbruchs und bei der Abfallerfassung für sie von ebenso großer Bedeutung, wie die von ihnen selbst zu verantwortende Getrenntheit bei der Lagerung der In- und Outputmassen. Die Größenzerkleinerung mit anschließender Klassierung (Absiebung) dient zwar vorrangig der Einstellung des geforderten Korngrößenspektrums, bietet darüber hinaus jedoch auch eine Hilfe, um Materialkomponenten mit unerwünschtem Einfluss auf die Rezyklateigenschaften aus dem Materialstrom auszuschleusen. So reichert sich beispielsweise im Material der Korngröße $< 4\text{mm}$, das bereits im hohen Maße durch die mechanischen Einwirkungen während des Abbruchgeschehens und weiter im Zuge der Brech- und Siebvorgänge bei der Aufbereitung entsteht, eine Vielzahl der Stoffkomponenten an, die ungünstige Wirkungen auf die Betonherstellung bzw. die Eigenschaften des Betonfertigproduktes haben bzw. haben können. Untersuchungen von Nicolai (1997) belegen zum Beispiel, dass sich bei der Aufbereitung 70 - 90 % des Gipsanteils im Bau-schutt in der Absiebfraktion $0/16\text{ mm}^{46}$ anreichern. Sie führen dort zu Gehalten von 3 % und mehr und machen damit die Verwendung als Betonzuschlagstoff unmöglich. Dies ist einer der Gründe, weshalb die nachfolgend erläuterten technischen Zulassungsregelungen, die oft auch als Brechsand bezeichnete Feinkornfraktion $< 2\text{ mm}$ als Einsatzstoff zur Betonherstellung ausschließen.

Die Herstellung von Körnungsgemischen bestimmter Größenzusammensetzung erfolgt sowohl im Natursteinwerk als auch bei der Rezyklataufbereitung durch Absiebung. Für die Bezeichnung dieser Körnungsgemische ist die Nennweite jener Siebe maßgebend, die dem jeweils angestrebten größten und kleinsten Korn entsprechen. Technologisch bedingt kann die Korntrennung nicht ganz scharf erfolgen, d.h. es verbleiben stets kleinere Mengen an Körnern im Gemisch, die nicht den oberen und unteren Siebschnitten entsprechen. Durch die Normung bestehen Festlegungen, wie hoch die Mengen an verbliebenem Über- und Unterkorn sein dürfen, damit bestimmte Qualitätskriterien erfüllt werden. Beton wird meist mit Gesteinskörnungen hergestellt, die in guter Abstufung Körner aller Größen enthalten, angefangen vom allerfeinsten bis zum gewünschten Größtkorn. Da bei der Feinfraktion rezyklierten Materials die oben angesprochene Problematik unerwünschter Rezyklateigenschaften auftritt und Zulassungsbeschränkungen gelten, sind zur Betonherstellung eingesetzte rezyklierte Gesteinskörnungen zumeist auf ein gröberes Korngrößenspektrum eingestellt (z. B. Größenklassen 8/16 bzw. 16/32). Bei den technisch weniger anspruchsvollen, massenmäßig aber dominierenden Einsatzbereichen für Betonrezyklat, wie beispielsweise dem Unterbau für Verkehrsflächen oder dem ungebundenen Einbau in Dämmen, weist das zum Einsatz kommende Material dagegen meist eine stetige Korngrößenverteilung bis zu einem Größtkorn von 32 mm oder größer auf. Dazu reicht in aller Regel bereits ein einstufiger Brechvorgang aus, wie er durch mobile Einsatztechnik vorgenommen werden kann.

⁴⁶ zur Bezeichnung der Körnungsgemische s. nachfolgende Ausführungen

Heterogene Ausgangsmassen so aufzuschließen, dass daraus Material generiert werden kann, das die für den Einsatz als Betonzuschlagstoff erforderliche stoffliche Reinheit und Korngruppenszusammensetzung hat, gelingt mit der momentan zum Einsatz kommenden Zerkleinerungstechnik nur bedingt. Diese setzt vor allem auf mechanische Beanspruchung unter Verwendung verschiedener Arten von Brecheraggregaten (vorrangig Backen- und Prallbrecher). Die dabei ausgeübte extreme mechanische Krafteinwirkung bewirkt jedoch auch eine teils übermäßig starke Zerkleinerung des Zuschlags sowie die Bildung unerwünschter Risse und Abkantungen. Unterkörniges wie auch qualitativ minderwertiges Material bilden im Aufbereitungsprozess die Hauptkomponenten des vom Verwertungsweg für Betonzuschlag abgehenden Mengenstromes. Eine Abbildung der zur Ausschleusung kommenden Massen muss daher auch im Stoffstrommodell vorgenommen werden.

Zur Quantifizierung der Größenordnung des nicht einsetzbaren und damit dem Anlageneingangsstrom abzurechnenden Materials kann Bezug auf eine Reihe von Quellen genommen werden. Das dort angeführte Wertespektrum liegt im Bereich von oberhalb 20 Gew.-% bis zu 60 Gew.-% der Ausgangsmasse des Bauschuttmaterials. Behler (2002) nennt beispielsweise einen Wert von 50 % des Anfallvolumens an Abbruchmaterial, Weil (2004) oder auch das Umweltbundesamt (2003) führen Größenordnungen von etwas oberhalb 30 % an. Als weitere Referenz in dieser Richtung lassen sich auch die Norm-Siebliniendiagramme für die Herstellung von Gesteinskörnungen nutzen (s. Zement-Merkblatt Betontechnik 10.2004, 2008). Hieraus kann abgelesen werden, welche Masse an Gesteinskörnung des Anlageninputstromes nach Klassierung des größeren Körnungsanteils für die weitere Verwertung als Betonzuschlag verbleibt (Siebrückstand), wenn mittels Absiebung bei entsprechender Lochgröße die unerwünschten Feinanteile zur Ausschleusung kommen (s. Abbildung 4-3). In der Praxis derzeit am gebräuchlichsten ist die Abtrennung in Form von Vorsiebmaterial bis zu einer Korngröße von 8 mm, bei Verwertungen als Betonzuschlag werden in der Regel Körnungen > 5 mm zum Einsatz gebracht (KWTB 2001).

Nach anfänglicher Zulassung auch der Feinfraktion < 2 mm in Deutschland (DAfStb 2002) wurde im Zuge weiterer bautechnischer Forschung auf unvorteilhafte Aspekte und Risiken hingewiesen, mit der Folge, dass fortan auf die Nichtverwendung dieses Stoffanteils als Betonzuschlagstoff orientiert werden musste. Die Erschließung alternativer Verwertungswege für diesen RC-Massestrom ist seither intensiver Forschungsgegenstand (Behler et al. 2002, Müller o. A., EU-LIFE Environment Demonstration Project o. a., Moriconi 2007). Auch gegenwärtig soll in einem EU-weit geführten Projekt dieser Problematik wiederum vertiefend nachgegangen werden (LIFE+-Projekt EnBa, 2009).

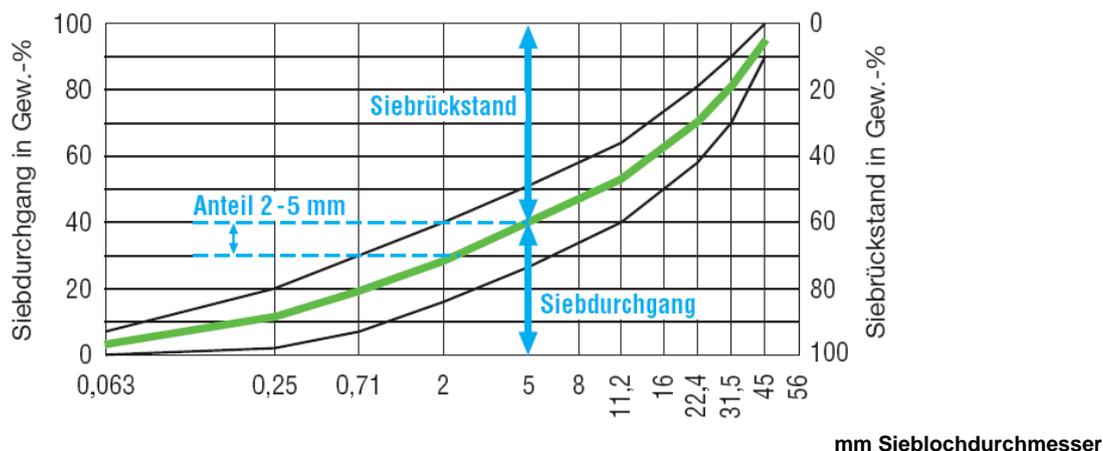


Abbildung 4-3: Beispiel für die Korngrößenverteilung (Sieblienverlauf) bei Betonbrechgut RB 0/45 mm (Quelle: Merkblatt für recyciertes Brechgut aus Betonrestmassen, Ausgabe 2008, Baustoff-Recycling Bayern)

4.3 Zulässiger RC-Einsatz

Zur Betrachtung des Einsatzes von mineralischem Bauabfall „aus dem Hochbau in den Hochbau“ lohnt es sich, Rückschau auf die in der Einführung erwähnte Verwendung von Trümmerschutt für die Gebäudewiedererrichtung in den Nachkriegsjahren zu halten. Dass in dieser Zeit eine ausgesprochene Notwendigkeit zum Einsatz solchen Materials für die Wiedererrichtung der zerstörten Gebäudesubstanz bestand, liegt auf der Hand. Bei den wiederverwendeten Baumaterialien handelte es sich nicht nur um komplette Mauersteine und Ziegel, die durch die Bevölkerung („Trümmerfrauen“) aus dem Schutt geborgen, geputzt und in ihrer ursprünglichen Form wieder zum Bauwerksneubau genutzt wurden. Auch mineralischer Bruch fand als Zuschlag für Beton Eingang in die Gebäudekonstruktionen. Insgesamt ist die Rede von ca. 600 Mio. m³ Trümmerschutt, der überwiegend aus Ziegeln bestand und zur Gewinnung von Sekundärbaustoffen nach dem letzten Weltkriegereignis eingesetzt wurde (Müller 2003). Ziegelsplitt und Mischungen aus Ziegel und Betonbruch waren somit die gebräuchlichsten Zuschläge für die Bauwerksstoffe des Wiederaufbaus.

Unter anderem durch Veröffentlichungen Grafs sind aus jener Zeit zahlreiche Versuche und praktische Beispiele für die Anwendung von Trümmerschuttrezyklaten für den Betonbau dokumentiert (u. a. Nachrichtenblatt der Militärregierung für den Stadtkreis Stuttgart 1945 und sowie 1946 a und b). In diesen Niederschriften werden Einsatzgrenzen für aus Bau-schutt gewonnene Zuschläge bei einer Betongüte von B160 beschrieben, was etwa einem Beton der heutigen Festigkeitsklasse C12/15 entsprechen würde. Für Betone der Güte B300, also einem heutigen C25/30 Beton, werden Trümmerbaustoffe wegen nicht mehr ausreichend gegebener Festigkeitsmerkmale als Zuschlagsstoffe ausgeschlossen (Nachrichtenblatt der Militärregierung für den Stadtkreis Stuttgart 1946a und b). Allerdings lag den damals getätigten Betrachtungen stets der Einsatz von 100 % sekundärem Mineralgemisch als Betonzuschlag zu Grunde. Anmerkenswert dabei ist, dass auch damals Gips als ein hauptursächliches Problem für die Gewinnung im Betonbau verwendbarer Rezyklate erkannt wurde und Richtlinien für die Aufbereitung des Trümmermaterials Anwendung fanden, um

Materialfraktionen mit unbedenklichen Eigenschaften einsetzen zu können (Universität Stuttgart 2006).

Eine intensiv geführte Bau- und Materialforschung und die weitere Präzisierung und Einführung von technischen Normen sowie Zulassungsregelungen sind seither zu Grundpfeilern geworden, durch die Anwendungsgrenzen bestimmt und notwendige Produkteigenschaften sichergestellt werden. Speziell für den Bereich des Bauens und hier insbesondere für den Betonbau mit seinen vielfältigen Möglichkeiten und Anwendungsgebieten bestehen umfangreiche normative Grundlagen in Form von europäischen und deutschen Standards. Hierzu gehören neben solchen, die den Beton an sich und seine verschiedenen Einsatzfelder betreffen, auch Normen für die einzelnen Bestandteile, aus denen Beton erzeugt werden darf. So bestimmen in erster Linie die normativen Vorgaben, was am Markt nachgefragt werden kann, und demzufolge auch die Art und Weise der Erfassung und Aufbereitung, die notwendig wird, um aus den vorhandenen Ausgangsmaterialien (in Form von Bauabfällen) die geforderten Produkte herstellen zu können. Während also in der Praxis jede Verwertungskette in Normen und Anwendungsregeln ihren Ausgangspunkt hat, wird dieser Aspekt bei der Stoffstrombildung für das Stoffstrommodell den Sachverhalten von Erfassbarkeit und Aufbereitung aus rechnerischen Gründen nachgestellt und findet daher erst an dieser Stelle nähere Beleuchtung.

Der normative Rahmen für den Betrachtungsbereich dieser Studie wird vor allem durch die Normen DIN EN 206-1 (Beton) und DIN EN 12620 (Gesteinskörnungen für Beton) in Verbindung mit der nationalen Anwendungsnorm DIN V 20000-103 (Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken) sowie die DIN 4226-100: 2002-02 (Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen) gebildet. Damit in Bezug auf das Produkt Beton die Kriterien eines dauerhaften, gefahrlos einsetz- und wiederverwertbaren Baustoffs erfüllt werden, greifen die in diesen Normen getroffenen Regelungen eng ineinander.

Bei rezyklierten Gesteinskörnungen wird nach DIN 4226-100 entsprechend ihrer vorwiegenden stofflichen Zusammensetzung in vier Typen von Gesteinskörnungen unterschieden, die als Liefertypen bezeichnet werden:

- Liefertyp 1: Betonsplitt/Betonbrechsand
- Liefertyp 2: Bauwerksplitt/Bauwerkbrechsand
- Liefertyp 3: Mauerwerksplitt/Mauerwerkbrechsand
- Liefertyp 4: Mischsplitt/Mischbrechsand

Für jeden der genannten Liefertypen ist die stoffliche Zusammensetzung durch die Norm festgelegt (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2: Stoffliche Zusammensetzung der Liefertypen rezyklierter Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100:2002-02

Bestandteile	Zusammensetzung (Masseanteil in Prozent)			
	L-Typ 1	L-Typ 2	L-Typ 3	L-Typ 4
Beton und Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Klinker, nicht porosierter Ziegel	≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Kalksandstein			≤ 5	
Andere mineralische Bestandteile ^a	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Fremdbestandteile ^b	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1

^a Andere mineralische Bestandteile sind zum Beispiel: porosierter Ziegel, Leichtbeton, Porenbeton, haufwerksporiger Beton, Putz, Mörtel, poröse Schlacke, Bimsstein.

^b Fremdbestandteile sind zum Beispiel: Glas, Keramik, NE-Metallschlacke, Stückgips, Gummi, Kunststoff, Metall, Holz, Pflanzenreste, Papier, sonstige Stoffe.

Die baubetriebliche Verarbeitung von rezyklierten Gesteinskörnungen zur Betonherstellung ist aufgrund deren, von natürlichen Zuschlägen abweichenden Eigenschaften mit einigen zusätzlichen Erfordernissen verbunden. Dazu gehört zum Beispiel das Vornässen oder die Zugabe verflüssigender Zusatzmittel. Zum Erreichen vergleichbarer Festigkeitswerte wie im Falle des Einsatzes natürlicher Gesteinskörnungen wird des Weiteren in der Regel von einer erhöhten Zugabemenge an Zement ausgegangen.

Untersuchungen zur Einsetzbarkeit und zu Auswirkungen des Einsatzes von RC-GK bei der Betonherstellung sowie den erforderlichen baubetrieblichen Anpassungen sind bis heute Gegenstand intensiver Forschung. Im Ergebnis eines Forschungsprojektes in den 90er Jahren (BMBF-Forschungsprojekt "Baustoffkreislauf im Massivbau" (BIM)) hat der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStB) eine Richtlinie zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen im Beton erstellt, die bauaufsichtlich eingeführt wurde und bis heute Gültigkeit besitzt (DAfStB 2004).⁴⁷

Durch Teil 1 der Richtlinie wird der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung am gesamten Gesteinskörnungsvolumen des Betons begrenzt. Dieser Anteil ist von der Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung, also dem Liefertyp, abhängig. Teil 1 der Richtlinie legt diesbezüglich außerdem die ausschließliche Verwendung von Liefertyp 1 und Liefertyp 2 nach DIN 4226-100 fest. Damit ist auch das Einsatzspektrum an rezyklierten Zuschlägen für Betonanwendungen des Hochbaus auf reinen Betonsplitt sowie Betonsplitt mit einem maximalen Anteil von bis zu 30 Gew.-% nicht porosierter Ziegel und Kalksandsteine eingeschränkt. Nach einer Überarbeitung der Richtlinie sind seit 2004 ferner die zulässigen Anteile rezyklierter Gesteinskörnung im Beton auf das Korngrößenspektrum > 2 mm beschränkt. In Abhängigkeit vom Anwendungsbereich dürfen bei Einbringung des Liefertyps 1 maximal 45 Vol.-% und bei Nutzung des Liefertyps 2 maximal 35 Vol.-% des gesamten Gesteinskörnungsvolumens im Beton von rezyklisiertem Material ersetzt werden. Rezyklierte Gesteinskör-

⁴⁷ Bis zur Einführung dieser Richtlinie im August 1998 bedurfte die Verwendung von rezyklierten Zuschlägen für Konstruktionsbeton nach DIN 1045 jeweils einer Zustimmung im Einzelfall.

nung ≤ 2 mm darf nicht verwendet werden. Unter Einhaltung dieser Festlegungen kann die Bemessung analog der Bemessung für Normalbeton nach DIN 1045-1 erfolgen. Ein zusätzlicher Weg, rezyklierte Gesteinskörnungen auch außerhalb dieser Regelungen im qualifizierten Betonbau einzusetzen, ist der einer Einzelzulassung nach Prüfung beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt).

Tabelle 4-3: Gemäß Richtlinie des DAfStB zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%) im Beton

Anwendungsbereich		Gesteinskörnungstyp nach DIN 4226-100	
Alkalirichtlinie	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	1	2
WO (trocken)	XC1	≤ 45	≤ 35
WF (feucht)*	X0, XC1 bis XC4	≤ 35	≤ 25
	XF1* und XF3* und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 25	≤ 25
	XA1		

*Die Gesteinskörnung muss einer unbedenklichen Alkaliempfindlichkeitsklasse im Sinne der Alkalirichtlinie entsprechen oder vorbeugende Massnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Sinne der Alkalirichtlinie sind einzuhalten.

Bei Beton in feuchter Umgebung mit Alkalizufuhr von aussen, entsprechend WA der Alkalirichtlinie, ist die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung nur erlaubt, sofern durch ein Gutachten die im Altbeton enthaltene Gesteinskörnung einer unbedenklichen Alkaliempfindlichkeitsklasse zugeordnet wird.

Beton aus rezyklierter Gesteinskörnung ist für Spannbeton und Leichtbeton nicht zugelassen.

Die Begrenzung der zulässigen Anteile an Rezyklat als Zuschlagsstoff zur Herstellung normierter Betonzeugnisse erfolgt mit dem Ziel, dass maximal nur eine Menge sekundärer Gesteinskörnungen eingesetzt werden kann, bei der ausreichende Gewähr gegeben ist, dass die bemessungsrelevanten Eigenschaften des Betonproduktes nicht maßgeblich verändert werden. Im Gegensatz dazu würde es nach Erkenntnissen der Forschung zur Herstellung von Beton mit ausschließlich rezykliertem Zuschlag in bestimmten Fällen erforderlich werden, je nach Anwendungsbereich und Belastungsprofil eine entsprechende Bemessungsanpassung vorzunehmen. Anläufe in diese Richtung wurden mit der Unterstützung durch Forschungsergebnisse (Roos 2002) unter anderem mit dem Entwurf eines Teils 2 zur DAfStB-Richtlinie bereits unternommen. Durch diesen Richtlinienenteil war unter Beachtung eines erhöhten Teilsicherheitsbeiwertes und eines Mindestmaßes für die Bewehrung unter anderem die Zulassung der GK-Liefertypen 1 und 2 nach DIN 4226-100 mit bis zu 100 % Volumenanteil sowie des Liefertyps 3 jeweils nur für Betone in den Expositionsklassen X0 und XC1 vorgesehen (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt 2007). Eine Veröffentlichung und praktische Übernahme dieses Richtlinienentwurfes hat bislang nicht stattgefunden. Auch hier dauern in Deutschland, ebenso wie in anderen Ländern Europas, die Forschungen mit noch offenem Ergebnis weiter an.

Anwendungsfelder, die mit zum Teil bedeutend höhere Einsatzquoten rezyklierter Gesteinskörnungen als durch die DAfStB-Richtlinie vorgegeben realisierbar sind, existieren derweil bereits in beachtlichem Umfang. Sie betreffen Bereiche, bei denen nicht alle Anforderungen

nach DIN 1045 zwingend erfüllt werden müssen. Dies ist vor allem im nicht konstruktiven Betonbau des Wege-, Garten- und Landschaftsbaus, beim so genannten Rückenstützbeton, für Betonanwendungen zum Pflasterunterbau oder zur Herstellung von Rohrauflagern und Sauberkeitsschichten der Fall. Da diese Betone nicht der strengen Normung nach EN 206 unterliegen, kann deren Abgabe zumeist als Beton nach Zusammensetzung erfolgen, d.h. hier können Forderungen der Abnehmerseite, bzw. des Betonanwenders nach höheren Gehalten an rezyklierten Gesteinskörnungen in aller Regel berücksichtigt und umgesetzt werden. Spezielle Regelungen für Beton mit rezykliertem Zuschlag sind in der für Deutschland gültigen Betonnorm DIN 1045-2 zwar auch nicht enthalten, mit dem Hinweis auf Beachtung der DAfStb-Richtlinie beim Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen zur Betonherstellung und ihrer bauaufsichtlichen Anwendung bestehen aber hinreichende Festlegungen für diesen speziellen Verwertungsweg.

In Anbetracht des erreichten Forschungsstandes, wonach sich ein Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen als Betonzuschlag prinzipiell als möglich erweist, jedoch auch immer mit gewissen Auswirkungen auf die Betoneigenschaften in Verbindung steht, muss eingedenk grundlegend bestehender Sicherheitserfordernisse sowie der weiter wachsenden Diversität von Betonanwendungen auch für die Zukunft von Einschränkungen normativer Art beim Einsatz dieser Gesteinskörnungen ausgegangen werden (Rubli 2005). Dies gibt Veranlassung, die Stoffstrommodellierung innerhalb des Ressourcenschonungsmodells im Wesentlichen unter Bezug auf die gegenwärtigen Zulässigkeitsregeln für Deutschland zu führen, die überdies im Bereich weltweit vorhandener Regelungen liegen (Roos, 2002, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, 2007).

4.4 Aktueller Stand des Einsatzes mineralischer Bauabfälle als Betonzuschlagstoff

Der Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB) hat als Arbeitsgemeinschaft der Bauwirtschaft im Rahmen einer Selbstverpflichtung über das letzte Jahrzehnt jährlich eine Menge an RC-Baustoffen zwischen 1 und knapp unter 3 Mio. Mg ermittelt, die als Betonzuschlag genutzt wurden (KWTB, 1996-2007). Die Angaben erlauben aber keine Unterscheidung dieser Mengen nach Hoch- und Tiefbau.

Die zu dieser Studie durchgeführten Recherchen bei Baustoffherstellern⁴⁸, einschlägig forschenden Einrichtungen⁴⁹, Vertretergremien der Bauwirtschaft⁵⁰, Statistikstellen und über die Informationsmedien von Literatur und Internet bestärken die Vermutung, dass Anwendungen außerhalb des Hochbaus (z. B. im Straßen- und Wegebau sowie beim Bau von Lärmschutzwällen) als die Hauptabsatzbereiche für RC-Betonzuschlagstoffe anzusehen sind und nur

⁴⁸ Telefonische Umfrage im Zeitraum 01-05/2009 unter Betonwerken mit Niederlassungen in verschiedenen Bundesländern

⁴⁹ u. a. Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (Hr. Knappe), Bauhaus Universität Weimar (Prof. Müller), TU Dresden, Umweltbundesamt

⁵⁰ u. a. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hr. Schäfer), Deutscher Abbruchverband (Hr. Pocha), Bundesvereinigung Recyclingbaustoffe (Hr. Ostendorf) u. Einzelbefragungen von Bauakteuren (Hrn. Nitzsche, Kamlot u. a.)

sehr geringe Mengen tatsächlich Eingang in den Hochbau gefunden haben⁵¹. Erwähnenswerte Beispiele aus Vergangenheit und Gegenwart finden sich im Bereich des Hochbaus vor allem in Demonstrationsvorhaben, darunter die Errichtung der Zentrale der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück in den Jahren 1994/95, der Bau eines Gewerbe- und Parkhauses am Vilbeler Weg sowie der Wohnanlage Waldspirale im Rahmen des Friedensreich-Hundertwasser-Architekturprojektes der Jahre 1998 - 2000, beides in Darmstadt, oder ein derzeit laufendes Bauvorhaben zur Errichtung eines Wohnkomplexes im rheinland-pfälzischen Ludwigshafen (EUWID Re 2009).

Ein Fakt, den es bislang für alle untersuchten Demonstrationsbeispiele festzuhalten gilt, ist, dass die eingesetzten Rezyklatkörnungen nicht Produkte im Sinne der herkömmlichen Praxis waren, sondern eher als Sonderfraktionen zu betrachten sind (UBA 2008b)⁵². Für diese Bewertung maßgebend ist dabei weder der besondere Status der Baumaßnahme als Demonstrationsvorhaben, noch das damit verbundene Untersuchungsanliegen, sondern allein der Umstand, dass die zur Herstellung der Rezyklate genutzten Ausgangsmaterialien stets von bekannter Herkunft waren, teils sogar in spezieller Form vorlagen (z. B. im Falle der Zentrale der Deutschen Bundesstiftung Umwelt als Betonsplitt aus noch nicht eingesetzten Betonfertigwaren, deren Aussonderung aufgrund von Herstellungs- bzw. Lagermängeln erfolgt war (Wöhnl 1994)) und zudem einer gesonderten Aufbereitung, Beprobung und Überprüfung unterzogen wurden⁵³. Neben einigen anderen begünstigenden Gegebenheiten muss auch für die häufig als Vorbild angeführten Bauvorhaben mit rezyklierten Gesteinskörnungen im Züricher Stadtgebiet das Vorliegen besonderer Bedingungen zur Bauschutttaufbereitung und Bildung geeigneter Gesteinskörnungen konstatiert werden (Hoffmann, Jacobs 2008). Dazu gehören unter anderem die Möglichkeiten der Nassaufbereitung und der Nutzbarkeit von Gesteinsmaterial aus der Bodenwäsche zur Erzeugung geeigneter Gesteinskörnungen unmittelbar vor Ort (Fa. Eberhard 2009).

Da der Baualltag ein Agieren unter den gegebenen Voraussetzungen erfordert und die für einen Rezyklateinsatz günstigen Bedingungen im großen Maßstab nicht vorliegen, werden bei Verwendung rezyklierten Betonzuschlags in Deutschland derzeit nahezu ausschließlich Gesteinskörnungen aus dem Betonabbruch, d.h. beim Abriss von Brücken, Betonfahrbahnen, Fertigteilgebäuden oder Fundamenten gewonnener reiner Betonbruch, eingesetzt. Dazu in der Praxis getätigte Nachfragen bestätigten, dass das aus mineralischen Abfallgemischen aufbereitete Material bislang im Hochbau keine Anwendung findet. Den dabei erhaltenen Angaben zufolge (Schäfer 2009) werden zur Herstellung von Beton je m³ ca. 650 kg Gesteinskörnung der Fraktion 16/32 eingesetzt. So ein teilweiser Ersatz dieser Menge durch RC-Zuschlag erfolgt, ist dies in den bekannten Fällen (Demonstrationsvorhaben ausgenommen) zumeist durch Einsatzmengen in der Größenordnung von etwa 150 kg pro

⁵¹ Ein tatsächlicher Nachweis für den aktuellen Einsatz von RC-Material als Betonzuschlagstoff bei Hochbauanwendungen gelang nicht. Laufende Demonstrationsvorhaben sowie entsprechende Aussagen von Vertretern der Bauwirtschaft (u. a. Hr. Schäfer vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein e.V.) belegen aber, dass zumindest in sehr geringen Mengen RC-Material als betonzuschlagsstoff im Hochbau zum Einsatz gebracht werden.

⁵² siehe Ausführungen auf S. 113 der genannten Quelle

⁵³ siehe auch Internetpräsentation zum Demonstrationsvorhaben Ludwigshafen unter <http://www.rc-beton.de>

Kubikmeter Beton erfolgt. Im Bereich des Hochbaus mit rund 80 % der Betonanwendungen im Bereich der Festigkeitsklassen $\leq C30/37$ und einem spezifischen Betonverbrauch zwischen 100 und 180 m³ Beton je 1000 m³ umbauter Raum würden bei Anwendung dieser Ersatzmenge RC-Gesteinskörnung im Mittel ca. 17 Mg Rezyklatmaterial je 1000 m³ umbauter Raum untergebracht werden können.

Aufgrund der Vorteile für den Verwender hat sich in der Baupraxis der „Beton nach Eigenschaften“ etabliert. Damit wird eine Betonerzeugung umschrieben, bei der die grundlegenden Eigenschaften und gegebenenfalls weitere vom Betonprodukt geforderten Anforderungen gegenüber dem Hersteller festgelegt sind. Der Endanwender führt dabei die Ermittlung seines Bedarfes an Beton durch und bestellt diesen beim Hersteller nach Eigenschaften gemäß der dazu vorhandenen Normen. Der Hersteller seinerseits ist dafür verantwortlich, den Beton so herzustellen, dass dieser bei der Bereitstellung die geforderten Eigenschaften hat und die jeweiligen Anforderungen erfüllt. Für den Anwender des Betons entfällt somit, zumindest bezüglich der Betonzusammensetzung die Aufgabe einer Überprüfung, ob der Beton den gesetzten Anforderungen tatsächlich genügt. Genau diese Verantwortung geht allerdings im Falle eines „Betons nach Zusammensetzung“ auf die Anwenderseite über. Bei dieser Art der Betonerzeugung gibt der Auftraggeber Zusammensetzung und Ausgangsstoffe des Betons vor, was auch die Möglichkeit einschließt, gezielt einen Einsatz von rezyklierten Zuschlägen zu verlangen. Da Zusammensetzung und Ausgangsstoffe für die Betoneigenschaften ausschlaggebend sind, ist die Verantwortung des Herstellers hier auf die Lieferung eines Betons in der gewünschten Zusammensetzung beschränkt, dass auch eine Eignung für den geplanten Einsatzzweck vorliegt, muss dann vom Anwender durch Prüfung sichergestellt und von ihm verantwortet werden. Ausgelöst von Sicherheitsbedürfnissen auf beiden Seiten entsteht aus dieser Verantwortungsverteilung heraus eine Zurückhaltung, die sich in der Praxis durch ein generell höheres Vertrauen in natürliche Ausgangsstoffe und der fehlenden Berücksichtigung von Rezyklat im Bereich der anspruchsvolleren Betonanwendungen des Hochbaus äußert. Hinsichtlich eines gewünschten Zuwachses beim Einsatz von rezykliertem Betonzuschlag ist die betonherstellende Seite daher nicht alleiniger Adressat. Vielmehr muss auch die Auftraggeberseite, und hier zuvorderst die öffentlichen Bauträger, endlich Bereitschaft zeigen, derart produzierte Betone zielgerichtet einsetzen zu wollen und die dazu notwendige Verantwortungsträgerschaft zu übernehmen. Bis auf Leitempfehlungen und Absichtserklärungen ist sie hier in der Vergangenheit vieles schuldig geblieben. Gleichzeitig zeigt sich auch an diesem Punkt, dass bei dem häufig zitierten Vorzeigebeispiel Schweiz oft günstigere Rahmenbedingungen für den Rezyklateinsatz (Hofmann, Patt 2006) aufgrund von teils progressiveren Einstellungen bei den öffentlichen Bauträgern vorliegen.

Demgegenüber hat sich auch in Deutschland der Wiedereinsatz von Produktionsresten, sogenanntem Rückbeton und rezyklierten Betonzuschlägen aus der Eigenherstellung bereits in großer Breite als Teil des Produktionsalltags bei den Betonproduzenten durchgesetzt. Signifikante zusätzliche Erschließungspotenziale werden von Seiten der Fachleute an dieser Stelle nicht mehr erwartet.

Dass auch Situationen einer gewissen Rohstoffknappheit nicht automatisch ein erhöhtes Nachfragepotenzial an rezyklierten Gesteinskörnungen in bestimmten Regionen nach sich ziehen, ist aus statistischem Datenmaterial abzuleiten. So weisen in einigen Regionen

Deutschlands auch die Naturvorkommen an Gesteinsmaterial zum Teil Inhaltsstoffe auf, die unerwünschte Effekte im Beton bewirken können. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Pyriteinschlüsse oder Einlagerungen quellfähiger Tonminerale. Ebenso von Bedeutung sind Gehalte an reaktionsfähigen Kieselsäuren, die vor allem in Teilen Nordostdeutschlands verstärkt anzutreffen sind und in Reaktion mit bestimmten Zementen Treiberscheinungen (Alkalitreiben) im Beton verursachen. Die Problematik findet durch die sogenannte Alkali-Richtlinie (DAfStb 2004: Alkali-Richtlinie) im Bereich der Betonerzeugung Beachtung. Resultierend daraus, schränken sich die einsetzbaren Vorkommen an Naturgesteinskörnungen örtlich teilweise stark ein (Abbildung 4-4).



Abbildung 4-4: Vorkommensschwerpunkte von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen (Anwendungsbereich Alkali-Richtlinie Teil 2 [blau] und angrenzende Bereiche [grau] mit lokalen Aufkonzentrationen an alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen) (Quelle: Schäfer 2009)

Obwohl solche Gebiete prädestiniert dafür erscheinen, eine grundsätzlich höhere Relevanz und Nachfrage an rezyklierten Gesteinskörnungen zu verzeichnen, liegen auch hier keine Anhaltspunkte vor aus denen auf eine verstärkte Bereitstellung bzw. Anwendung als alternative Zuschlagsstoffe abgeleitet werden kann (s. auch Tabelle 4-4). Neben der generell feststellbaren Zurückhaltung beim Einsatz von RC-Gesteinsmaterial zur Betonfertigung spricht dies insbesondere auch für ausreichend vorhandene Möglichkeiten, sich über andere Verfahren, wie z. B. die Erzeugung von Kiesbrechsand oder Splitten aus Festgestein, oder über entsprechend gestaltete Bezugsketten die benötigten Mengen Primärgesteinskörnungen wirtschaftlich verfügbar machen zu können. Gleichzeitig ist durch die Vorratssituation Deutschlands in Bezug auf die mineralischen Grundbaustoffe Sand, Splitt und Kies eine grundsätzliche Versorgungssicherheit auch auf längere Sicht gegeben. So wird das Vorratsvolumen an den natürlichen Betonrohstoffen Kies und Sand in Deutschland einer Studie der Holzmann AG zufolge (Philipp Holzmann AG 1997, zitiert in Jeske et al. 2004) auf über 200 Milliarden Tonnen geschätzt, was bei Fortbestand der Entnahmeraten vergangener Jahrzehnte eine Gesamtreichweite von mehreren hundert Jahren bedeuten würde und auch bei regional differenzierter Betrachtung die Versorgung noch über mehrere Jahrzehnte sicherstellt (Werner et al. 2007).

Tabelle 4-4: Recherchierte Mengen an hergestelltem Betonzuschlag aus RC-Material in Tausend Mg (zusammengefasst aus Angaben d. statistischen Landesämter)

	1996	1998	2000	2002	2004	2006
Baden-Württemberg	85					229,8
Bayern	201		22,5		74,6	47,2
Berlin						
Brandenburg						24,6
Bremen						0
Hamburg	1					0
Hessen	0					
Mecklenburg-Vorpommern	36		138,4	65,4	77,6	12,5
Niedersachsen	223					29,7
Nordrhein-Westfalen	737					114,3
Rheinland-Pfalz	0				68,7	127
Saarland	0					
Sachsen	237					131,6
Sachsen-Anhalt						1,2
Schleswig-Holstein		41,9		108,8		14,9
Thüringen	67		674,5	310,4	90,5	
Deutschland gesamt	1587	1500	1943	761	671	788

Leere Felder: keine Angaben in der Statistik

Ebenfalls ist die Aufbereitungssituation in einen Zusammenhang zur derzeitigen Situation des Einsatzes von Rezyklat als Betonzuschlagstoff in Deutschland zu setzen. Obwohl sich der kontrollierte Rückbau von Gebäuden als Abbruchverfahren und die Erfassung von Bauabfällen in getrennten Materialfraktionen in der Praxis immer stärker durchsetzen, bietet die Situation im Bereich der Aufbereitungsanlagen kaum die erforderlichen Voraussetzungen, um rezyklierte Körnungsgemische in der für die Betonerzeugung benötigten Qualität zuverlässig und dauerhaft herstellen zu können. Neben dem generell bestehenden Mangel an Komponenten, mit denen die stoffliche Trennung mineralischer Gemische bei der Bauabfallaufbereitung großtechnisch bewirkt werden kann, stellt das verfügbare Anlagenspektrum in dieser Hinsicht ein Hauptproblem dar. Demnach machen in Deutschland mobile und semi-mobile Aufbereitungsaggregate etwa im Verhältnis von 3:1 den Hauptteil der für die Bauabfallaufbereitung genutzten Aufbereitungsanlagen aus, gemessen an der Zahl stationärer Aufbereitungsbetriebe (Jahresstatistiken der Länder und Bundesstatistik zur Umwelt 2008). Im Vergleich mit stationären Betrieben tragen die mobilen Anlagentypen inzwischen in Summe auch den größten Anteil zur Gesamtaufbereitungsmenge an Bauschutt bei. Dabei ist anzumerken, dass mobile/semimobile Anlagen im Vergleich zu stationär betriebenen Aufbereitungsstätten in der Regel einfacher konzipiert und ausgestattet sind und zumeist nur über einstufig ausgelegte Aufbereitungsmöglichkeiten verfügen, was es schwieriger macht, Produkte mit einer Eignung als Betonzuschlagstoff zuverlässig herzustellen. Belegt wird dies durch Untersuchungen der Aufbereitungsergebnisse in deutschen Anlagen (ENTSORGA 1997, Jeske et al. 2004), wonach die zur Verwertung bereitgestellten Rezyklate den Grundanforde-

rungen an Betonzyklus häufig nicht genügen würden und somit für diesen Zweck einer zusätzlichen Aufbereitung in qualifizierteren Anlagen unterzogen werden müssten. Erschwerend für die Versorgung mit Betonzuschlagstoffen kommt hinzu, dass auch die Anzahl der Anlagenbetreiber, die eine Herstellung solcher Produkte vornehmen, über die Jahre kontinuierlich gesunken ist (Tabelle 4-5). Der Anteil der betonzuschlagzeugenden Produktionsstätten liegt seit Jahren bei unter 5 % aller zur Bauschutttaufbereitung eingesetzten Anlagen in Deutschland.

Tabelle 4-5: Anzahl der Betreiber von Aufbereitungsanlagen (Bundesstatistik zu betonzuschlagherstellenden Anlagen (Statistisches Bundesamt, 2000-2006)

Jahr	herstellende Anlagen	davon im		herstellende Anlagenbetreiber
		stationären Betrieb	mobilen Betrieb	
2000	112	48	64	108
2002	95	36	59	91
2004	79	28	51	75
2006	89	k.A.	k.A.	72

Demgegenüber stellt sich die Situation in anderen Ländern, so auch der Schweiz, häufig diametral dar. Hier überwiegt die Zahl der stationären Aufbereitungsbetriebe, womit eine deutlich verbesserte Ausgangslage zur Versorgung des Marktes mit Betonzuschlagstoffen aus Bauschuttzyklen besteht (Schulz 2006) (Abbildung 4-5).

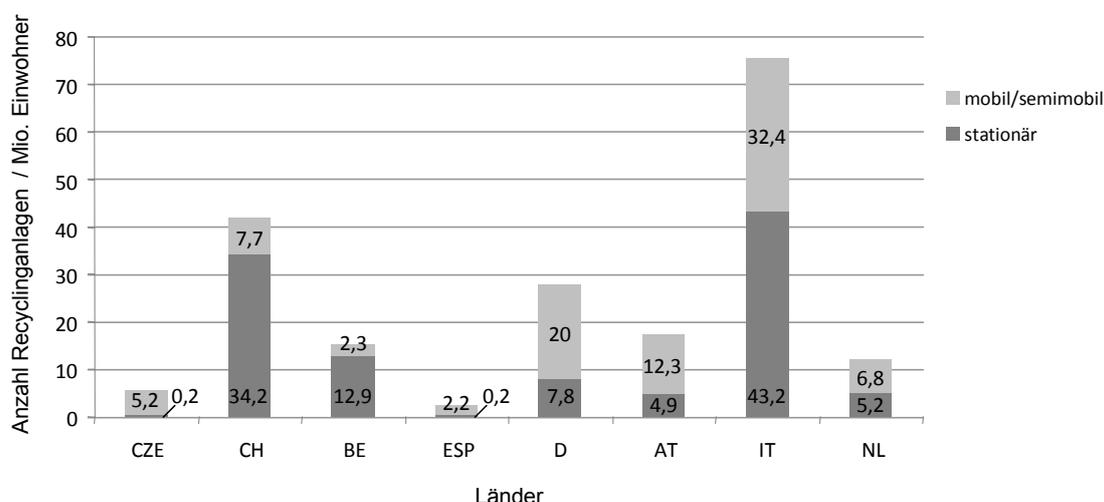


Abbildung 4-5 : Verteilung von Anlagenarten zur Aufbereitung von Bauabfällen (Quelle: Europäischen Baustoff-Recycling Verband 2005)

Im Zusammenhang mit der dargestellten Anlagensituation erweist sich der Sachverhalt der Qualitätssicherung als zusätzliche Problematik. Wenn, wie in der Statistik zu erkennen, auch die im Allgemeinen einfacher beschaffenen Anlagentypen zur Herstellung von Betonzuschlagstoffen in Deutschland zum Einsatz kommen, bedarf es einer Sicherheit, dass trotz technischer Beschränkungen, die als hochwertig auf den Markt gelangenden Gesteinskörnungen tatsächlich auch immer diesen Ansprüchen genügen. Eine solche Sicherheit ist allerdings nicht gegeben. Ungeachtet der bei Gesteinskörnungen geforderten Eigenschaftsprüfung und ihrer Kenntlichmachung mittels CE-Kennzeichen kann daraus keine Garantie

der Konformität mit den Normvorgaben abgeleitet werden, da dieser Nachweis ausschließlich auf Herstellerangaben fußt. Die CE-Kennzeichnung bildet primär kein Qualitätszeichen, sondern ein Handelskennzeichen für Produkte, die in Übereinstimmung mit einer Norm hergestellt worden sind (RC-Management Center Berlin 2006). Hersteller verfügen über die Möglichkeit, freiwillig zusätzliche Produktprüfungen durch unabhängige Prüfstellen vornehmen zu lassen und auf diesem Weg den Abnehmern endgültige Sicherheit zu verschaffen. Ob diese Verfahrensweise eine stets objektive und unbeeinflusste Beurteilung sicherstellt, wird allerdings noch sehr kontrovers beurteilt. Im Moment sieht sich die Aufbereitungsbranche jedenfalls noch Vorwürfen von Marktteilnehmern ausgesetzt, vereinzelt für den vorgesehenen Verwertungszweck unzureichend aufbereitetes Material in Verkehr bringen zu wollen (RC-Management Center Berlin 2006). Ein effektiveres, derzeit aber noch freiwilliges zusätzliches Qualitätssicherungsverfahren stellt die Güteüberwachung nach RAL dar. So sich die Teilnahme an diesem Überwachungssystem zu einem Standard am Markt entwickelt, sollte sich auch die Einsatzsituation von Rezyklaten im Betonbau verbessern.

Im Sinne der unabdingbaren Verwertungssicherheit darf inzwischen darauf gehofft werden, dass die mit den gegenwärtig diskutierten rechtlichen Regelungen für die Baustoffverwertung in Aussicht stehende verbindliche Güteüberwachung zu generell höheren Qualitätsbestrebungen führt und damit für weniger qualitätsorientierte Absatzbereiche die Lukrativität abnimmt. Gleichwohl wird auch eine stringenter Güteüberwachung allein kein ausreichendes Instrument sein können, mit dem sich die Eignung von RC-Material als Betonzuschlagstoff garantieren, und damit auch das Bemühen der Recycler, potenziell geeignetes Ausgangsmaterial entsprechend aufzubereiten, herbeiführen lässt.

Ein letzter Aspekt, der im Hinblick auf die gegenwärtigen und zukünftigen Chancen des Einsatzes von rezyklierten Gesteinskörnungen als Betonzuschlagstoffe im Hochbau Erwähnung finden soll, betrifft die baustofflichen Entwicklungen. Hier ist zu beobachten, dass Betonprodukte, bei denen sich der Einsatz von Rezyklatmaterial als Zuschlagstoff auch bislang schon ausschließt, im Baualltag immer häufiger zur Verwendung kommen. Dabei handelt es sich bspw. um hochfeste Betone, gefügedichte Leichtbetone, kunststoffmodifizierte, faser- und textiltbewehrte Betone oder aber selbstverdichtende Betone. Mit diesen Betonen können neue Einsatzbereiche erschlossen, und zudem auch anspruchsvolle Konstruktionen in deutlich geringerer Bemessung als im Falle von Normalbeton umgesetzt werden. Die hierdurch verringerte Menge benötigten Betons stellt ihrerseits auch einen Beitrag zur Ressourcenschonung dar. Schießl (2003, 24) stellt im Ausblick auf die Zukunft des Bauens zudem fest, dass Sonderbetonrezepturen für größere Bauvorhaben verstärkt zum Einsatz kommen werden. Hieraus würden weitere Begrenzungen möglicher Nachfragepotenziale für RC-Beton im Hochbau entstehen, da Spezialbetone auch in der Perspektive für den Einsatz von rezyklierten Zuschlägen eher ausgeschlossen bleiben werden. Nach einer von Praxisseite vorgenommenen Einschätzung (Schäfer 2009) wird eine Obergrenze beim Einsatz von rund 7 Millionen Tonnen RC-Material gesehen, dies hieße, nach heutigen Maßstäben würde bereits jeder Kubikmeter Hochbaubeton mit einem Anteil von ca. 150 kg rezyklierter Gesteinskörnung herzustellen sein.

4.5 Überführung in das Rechenmodell

Nachdem wesentliche Grundlagen im Zusammenhang mit der Bildung des RC-Stoffstroms angesprochen und unter Bezug auf die gegenwärtig bestehende Situation des Betonrecyclings durch den Hochbau reflektiert wurden, wird im folgenden Abschnitt erläutert, wie sich hiervon ausgehend die weitere Stoffstrommodellierung bis zur Ermittlung der maximalen Ressourcenschonungspotenziale vollzieht.

Der zur Ermittlung der technisch maximal erreichbaren Ressourcenschonungspotenziale erstellte Rechenansatz wird durch zwei Hauptkomponenten, der Komponente „Potenzielle RC-Stoffströme“ sowie der Komponente „Ressourcenschonungspotenzial“ (RESPOT) gebildet (s. auch Abschnitt 1.3). Die Komponente „Potenzielle RC-Stoffströme“ setzt sich im Weiteren aus zwei Modulen zusammen, die mit den Begriffen Bereitstellungspotenzial und Substitutionspotenzial beschrieben werden können. Für ein besseres inhaltliches Verständnis der einzelnen Komponenten bzw. Module sorgen die ihnen jeweils zu Grunde gelegten und nachfolgend wiedergegebenen Aussageziele.

- Komponente „Potenzielle RC-Stoffströme“

- Modul „Bereitstellungspotenzial“: Wie viel für den Betonbau einsetzbares Rezyklatmaterial lässt sich aus mineralischem Hochbauabfall zur Verfügung stellen?

- Modul „Substitutionspotenzial“: Wie viel Rezyklatmaterial kann durch Zubau in den Gebäudebestand im Rahmen technisch zulässiger Größenordnungen vom Betonbau aufgenommen werden und reichen die verfügbaren Mengen dafür aus?

- Komponente Ressourcenschonungspotenzial: Welche Menge Naturkiesmaterial wird auf Grund der tatsächlich möglichen Aufnahme an Rezyklat in den Betonbau über den Weg der Substitution freigesetzt und welchem vermeidbaren Abbauvolumen würde dies entsprechen?

Primäre Eingangsgrößen in das Rechenmodell bilden die in den vorangegangenen Modellschritten aus der Bestandsentwicklung abgeleiteten Baustoffströme. Dazu werden die in einem bestimmten Zeitfenster aus dem Gebäudebestand als Abfall abgehende Menge Baumaterial aus Beton und Ziegel, sowie die im gleichen Zeitfenster dem Bestand durch Neubau zugehende Menge Beton für Hochbauzwecke als Absolutwerte den Berechnungen quasi „übergeben“.

Im Modul Bereitstellungspotenzial wird die für die Betonherstellung nach technischem Ermessen bereitstellbare Masse an einsatzfähigem Rezyklat aus mineralischem Hochbauabfall berechnet. Als zulässige Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen für die Betonherstellung wird die Bereitstellungsmenge jeweils ausdifferenziert für die Stofffraktionen Betonsplitt und Ziegelsplitt ermittelt. Bei der dazu stattfindenden Massebilanzierung sind die im Zuge von Abriss und Aufbereitung entstehenden Erfassungs- und Ausschleusungsverluste in Abzug zu bringen. Der Rechenalgorithmus berücksichtigt diese Massereduktion unter Ansatz angenommener Quoten für Materialerfassung und Absiebungsanteil. Die Festlegung dieser Quoten nimmt im Wesentlichen Bezug auf die in den Abschnitten „Erfassbarkeit“ (s. Abschnitt 5.1) und „Ausschleusung“ (s. Abschnitt 5.2) angesprochenen Aspekte und ist im

Abschnitt 6.2 in Form konkreter Setzungen für die zur Modellrechnung genutzten Werte weiterführend spezifiziert. Erfassbarkeit und Ausschleusung stellen somit die zentralen Stellgrößen des Moduls Bereitstellungspotenzial dar. Mit der Ausweisung der potenziellen Bereitstellungsmenge liegen rechnerisch jene Mengen an Rezyklatmaterial vor, die der Betonherstellung zu einer bestimmten Zeit und innerhalb eines speziell geprägten Raumes maximal zur Verfügung gestellt werden könnten. Das Bereitstellungspotenzial reflektiert somit die Angebotsseite.

Die Teilkomponente Substitutionspotenzial ist darauf ausgerichtet die Nachfrageseite abzubilden. Es wird die Gesamtmasse an potenziell im Hochbau einsetzbarem rezyklierten Gesteinskörnungsmaterial ermittelt. Hierzu werden das Gesamtvolumen des zum Zubau kommenden Betons und die pro Volumeneinheit zulässigen Mengenanteile an stofflich unterschiedlichem Rezyklat multipliziert. Die Berechnungen werden über das gesamte Spektrum derzeit zulässiger RC-Gesteinskörnungstypen ausgeführt. Die spezifische Menge an RC-Stoff einer bestimmten Dichteklasse (Beton, Ziegel) bildet dabei eine notwendige Bezugsgröße. Sie bestimmt sich über das Mischungsverhältnis der jeweiligen Stoffe in den als Betonzuschlag einsetzbaren Gesteinskörnungsliefertypen und dem je Volumeneinheit Beton als Primärkörnungersatz zulässigen Anteil des jeweiligen Liefertyps (siehe Abschnitt 4.3). Damit dieser Rechenabschnitt auf der Ebene gleicher Einheiten erfolgt, wird die dem Bestand zugehende Betonmasse auf ein Volumenmaß umgerechnet. Dies erfolgt unter Nutzung eines mittleren Dichtefaktors für Normalbeton. Aufgrund der für jede Gesteinskörnungsmischung verschiedenen hohen Anteile an Beton- und Ziegelsplitt⁵⁴ und variierenden Zulässigkeitsgrenzen für die Einbringung dieser Mischungen zum Ersatz von Primärstoff im Beton (s. Abschnitt 4.3) kommt es zu unterschiedlichen Bedarfsmengen an den Materialfraktionen Beton- und Ziegelsplitt. Dabei nehmen in der absteigenden Rangfolge der Gesteinskörnungsliefertypen die einsetzbaren Mengen an Betonsplitt jeweils ab und die des Ziegelsplitts zu.

Die durch den Zubau an Beton potenziell aufnehmbare Rezyklatmenge aus Beton und Ziegel kann nunmehr mit der Angebotsseite abgeglichen werden. Dies führt zu der Feststellung, ob die zur Verfügung stehenden Rezyklatmengen der jeweiligen Stoffgruppe ausreichen, um den maximal zulässigen Ersatz an natürlichen Gesteinskörnungen durchzuführen, oder ob diesbezüglich ein Materialmangel besteht. Wo ein Rezyklatüberschuss vorliegt, sind Ressourcenschonungspotenziale maximal bis zur Aufnahmegrenze für Rezyklat durch den Zubaubeton ableitbar, besteht indes ein Mangel an RC-Material, kann die Substitution maximal bis zur völligen Abschöpfung des verfügbaren Rezyklatvorrates erfolgen.

Aus diesen Wechselbeziehungen wird in der Berechnungskomponente Ressourcenschonungspotenzial die erreichbare Substitution primärer Gesteinskörnungen unter Bezugnahme auf Naturkies als dem gewöhnlichen Gesteinskörnungszuschlag für Beton ermittelt. Dies erfolgt in der Komponente RESPOT. Da sich, wie oben ausgeführt, über die Wahl der Liefertypen unterschiedliche Konstellationen hinsichtlich der Auskömmlichkeit der zur Verfügung

⁵⁴ Während beim Liefertyp L1 das Anteilsverhältnis von Beton zu Ziegel bei 90:10 liegt, beträgt es beim Liefertyp L2 nur noch 70:30.

stehenden Mengen verschiedener Rezyklatmaterialien einstellen, werden auch hier die Berechnungen parallel für alle Liefertypen geführt.

Die für die Ressourcenschonung nach obigem Beziehungsgefüge jeweils in Betracht kommende Menge an Rezyklat wird unter Beachtung der Dichteunterschiede in das entsprechende Äquivalent an Primärgesteinskörnung umgerechnet. Damit steht dem tatsächlich vollziehbaren Rezyklateinsatz das hierdurch ersetzte Volumen an mineralischem Primärrohstoff gegenüber. Dieser Primärrohstoff steht nun theoretisch anderen Verwendungszwecken zur Verfügung bzw. kann im Abbau eingespart werden. Das Einsparpotenzial an natürlichen Gesteinskörnungen, das das Ressourcenschonungspotenzial darstellt, wird deshalb in der Einheit Volumen angegeben, da sich Ressourceneingriffe beim Natursteinabbau weniger über die Fördermasse, als vielmehr über das damit in Verbindung stehende Volumen an Naturraum definieren.

5 Modellannahmen zur Einschätzung zukünftiger Ressourcenschonungspotenziale

5.1 Gebäudebestandsentwicklung

Gegenstand dieses Kapitels ist es, ausgehend von sich abzeichnenden demografischen Entwicklungstrends plausible Bilder der Wohnungs- bzw. Gebäudebestandsentwicklung in den Bereichen Wohnen und Gewerbe zu entwerfen. Auf dieser Grundlage werden regionale Ausprägungen möglicher Ressourcenschonungspotenziale berechnet. Für den Bereich Wohnen wird an vorhandene Vorausberechnungen angeknüpft. Für den Bereich Gewerbe gibt es keine Vorausberechnungen, daher werden hierfür mögliche Entwicklungstrends unter Nutzung der formulierten spezifischen Entwicklungskenngrößen abgebildet.

5.1.1 Zeitliche Betrachtungsperspektive

Die Dynamik demografischer Entwicklungstrends unterscheidet sich nicht nur regional, sondern verändert sich auch in Richtung und Dynamik über den Zeitverlauf. Dies wird aus den sehr unterschiedlichen Verläufen der Haushaltszahlen deutlich, die Banse und Effenberger (2006) in ihrer Studie aufzeigen (Abbildung 5-1).

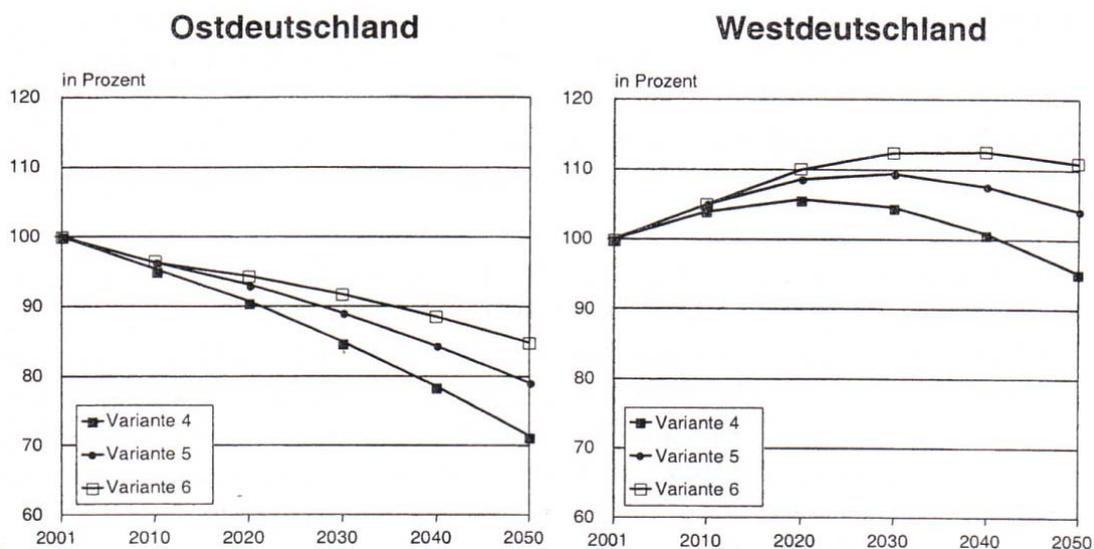


Abbildung 5-1: Bandbreite möglicher Haushaltsentwicklungen bis 2050 in Ost- und Westdeutschland (jeweils ohne Berlin) (Berechnungen von Banse, Effenberger (2006) auf der Basis der 10. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung) (Quelle: Banse, Effenberger 2006: 27)

Während in Ostdeutschland insgesamt ein anhaltender Abwärtstrend zu erkennen ist, steigen die Haushaltszahlen in Westdeutschland weiter an, bevor, je nach dargestellter Variante, zwischen 2020 und 2050 der Zenit überschritten wird. Auf Raumtypenebene differenzieren sich die zeitlichen Disparitäten der demografischen Entwicklung weiter aus.

Um Effekte zu berücksichtigen, die hieraus für die Ressourceninanspruchnahme erwachsen können, erfolgt die Einschätzung der Gebäudebestandsentwicklung in einer mittel- und langfristigen Perspektive. Als Zeithorizont der mittelfristigen Perspektive wird das Jahr 2020

gewählt. Bis zu diesem Zeitpunkt scheinen die Haushaltszahlen, die wesentliche Treibergröße für die Wohnungsnachfrage, in Westdeutschland insgesamt noch anzusteigen, in Ostdeutschland schreitet der bereits begonnene Rückgang der Haushaltszahlen voran. Ein weiteres Argument, das Jahr 2020 als mittelfristige Perspektive zu wählen, ist pragmatischer Natur, denn mit der Raumordnungsprognose aus 2005 (BBR 2005b) liegen bis 2020 Vorausberechnungen zukünftiger Neubaupotenziale vor, die im Konsistenzmodell genutzt werden. Über diesen Zeitraum hinaus sind keine entsprechenden Daten verfügbar.

Als langfristiger Betrachtungshorizont wird das Jahr 2050 gewählt. Bis zu diesem Zeitpunkt liegen amtliche Vorausberechnungen zur Bevölkerungsentwicklung sowie darauf basierend Studien zur Einschätzung möglicher Wohnungsbestandsveränderungen vor. Bei diesem Zeithorizont ist die Datenbasis vorliegender Vorausberechnungen mit hohen Unsicherheiten behaftet. Mittelfristig sind regionalisierte Aussagen zur Bevölkerungs- und Haushaltsentwicklung, vor allem aber auch zur potenziellen Entwicklung der Neubautätigkeit mit der Raumordnungsprognose 2006 bis 2020 verfügbar. Für den Zeitraum bis 2050 fehlen Anhaltspunkte zur kleinräumigen Regionalisierung. Hier beschränken sich Aussagen vorliegender Vorausberechnungen in der Regel auf Länderebene. Banse und Effenberger (2006) treffen Aussagen zur Wohnungsbestandsentwicklung nur noch differenziert nach Ost und West. Diese räumliche Differenzierung wird bei der Formulierung langfristiger Entwicklungstrends übernommen.

5.1.2 Annahmen zur Entwicklung des Wohnungsbestandes

Zur Abbildung der Entwicklung des Wohnungsbestandes wird auf die Aussagen der bereits mehrfach zitierten Arbeit von Banse und Effenberger (2006) zurückgegriffen, die aufeinander abgestimmte Bilder zur Entwicklung des Wohngebäudebestandes in Ost- und Westdeutschland bis zum Jahr 2050 entwirft. Grundlage dieser Arbeit sind Daten der 10. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung sowie die entsprechenden Hochrechnungen zur Zahl der Haushalte. Hieraus schätzen sie zukünftige Wohnungszugänge und Wohnungsabgänge. Die Aussagen zu den Wohnungszugängen beruhen auf Einschätzungen zum demografischen Potenzial der Ersthaushaltsgründungen sowie zum demografischen Potenzial für Eigentumsbildung. Darüber hinaus fließen Plausibilitätsüberlegungen, unter Beachtung der jüngsten Entwicklung der Bautätigkeit, ein. Annahmen zu Wohnungsabgängen basieren auf Hochrechnungen zur Zahl der Haushalte, auf Annahmen zur Leerstandsentwicklung sowie auf einem Abgleich mit der Einschätzung der Wohnungszugänge (ausführlich hierzu siehe Banse und Effenberger 2006: 28ff.). In der Studie werden mehrere Varianten der Bestandsentwicklung betrachtet. Der Basisvariante liegt die Annahme einer stabilen Leerstandsquote in Ostdeutschland und eines moderaten Anstiegs des Wohnungsleerstandes in Westdeutschland zugrunde (s. Banse, Effenberger 2006: 31). Auf diese Basisvariante wird im Weiteren zurückgegriffen. Für die mittelfristigen Perspektive (Betrachtungszeitpunkt 2020) bilden die eingeführten Raumtypen die Grundstruktur der regionalisierten Betrachtung. Auf diese Raumtypologie wird die in Anlehnung an Banse und Effenberger (2006) angenommene Bestandsveränderungsdynamik projiziert. Dabei wird das oben beschriebene Methodengerüst eingesetzt und wie folgt vorgegangen:

- Verteilung des Zubaus auf die Raumtypen entsprechend der Struktur der Verteilung des in der Raumordnungsprognose angegebenen Zubaus auf die Raumtypen.
- Verteilung des Abgangs auf die Raumtypen entsprechend der Verteilung des Abganges, der sich in den vergangenen Jahren in der Statistik widerspiegelt.
- Überprüfung der Plausibilität des Niederschlags der getroffenen Annahmen im resultierenden Bild der Bestandsnutzung, insbesondere der sich dabei abzeichnenden Leerstände.

5.1.2.1 Basisvariante

Die in Anlehnung an Banse und Effenberger (2006) verwendeten Zu- und Abgangszahlen sind in Tabelle 5-1 in der Unterscheidung nach Ost und West sowie nach den betrachteten Zeithorizonten aufgeführt. Der als Zugang angegebene Wert entspricht dem Wohnungszugang durch Neubau. Dieser weicht von den Angaben zum Zugang der Quellstudie ab. Letztere macht Aussagen zum Wohnungszugang insgesamt, einschließlich des Zugangs durch Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden. Da der hier betrachtete Zugang durch Neubau sich nur auf den Zubau an Wohnungen bezieht, die im Zuge der Erstellung neuer Gebäude entstehen, bleiben Bestandsveränderungen durch Bautätigkeit im Bestand unberücksichtigt. Die Berechnung des Zubaus durch Neubau erfolgt pauschal unter Verwendung der Anteile der durch Bautätigkeit im Bestand entstehenden Wohnungen am Gesamtzugang. Darüber werden Daten für Berlin ergänzt, zu denen Banse und Effenberger (2006) keine Aussagen treffen⁵⁵. Die Werte für den Abgang entsprechen somit denen der Quellstudie, korrigiert um entsprechend geschätzte Werte für Berlin. Eine weiter ausdifferenzierte Auflistung der angenommenen Bestandsveränderungen, die zusätzlich eine Unterscheidung nach EZFH und MFH vornimmt, ist in Anlage 6 abgelegt.

Tabelle 5-1: Überblick über die angenommenen Werte für den Zugang und Abgang an Wohnungen im Wohngebäudebestand in 2020 und 2050 (eigene Berechnungen in Anlehnung an Banse und Effenberger 2006:28ff.)

Bezugsjahr	Art der Bestandsveränderung	Wohnungen /Jahr	
		Westdeutschland und Berlin	Ostdeutschland (ohne Berlin)
2020	Zugang durch Neubau	187.345	17.401
	Abgang	63.200	50.000
2050	Zugang durch Neubau	93.717	12.720
	Abgang	231.600	50.000

⁵⁵ Banse und Effenberger (2006) machen Angaben für Ost- und Westdeutschland, jeweils ohne Berlin. In den verwendeten Zahlen findet Berlin Berücksichtigung. Dabei wird Berlin entsprechend der in der Raumordnungsprognose 2009 vorgelegten Gliederungssystematik der Raumtypen zu Westdeutschland zugeordnet. Die Bautätigkeit und Abrisstätigkeit für Berlin wurde überschlägig geschätzt. Dabei wurde die auf Einwohner bezogene Neubauquote und Abgangsquote aus Banse, Effenberger (2006) für Westdeutschland ermittelt. Unter Verwendung dieser Quoten sowie der Einwohnerzahl Berlins wurden Hochrechnungen vorgenommen.

Tabelle 5-2 zeigt das Ergebnis der Projektion des Zugangs und Abgangs auf die Ebene der Raumtypen. Die angegebenen Werte beziehen sich auf das Bezugsjahr 2020 (für 2050 erfolgt keine Differenzierung nach Raumtypen, sondern eine Regionalisierung auf der Ebene Ost/West; s. o.). Die in der Tabelle 5-2 angegebene Nummerierung der Raumtypen entspricht der oben eingeführten Systematik der Raumtypen.

Tabelle 5-2: Projektion des Wohnungszugangs und Wohnungsabgangs auf die Raumtypen für 2020

Art der Bestandsveränderung	Wohnungen /Jahr					
	Westdeutschland			Ostdeutschland		
	Raumtyp 1	Raumtyp 2	Raumtyp 3	Raumtyp 4	Raumtyp 5	Raumtyp 6
Zugang durch Neubau	50.974	25.467	110.904	2.655	9.312	5.434
Abgang	22.623	9.901	30.676	11.060	35.201	3.739

Die Zuordnung der von Banse und Effenberger angenommenen Werte der Bestandsveränderung auf die Raumtypen wird mit Hilfe des Konsistenzmodells vorgenommen. Durch die Generierung der sich dabei abzeichnenden Wohnungsleerstände kann eine Plausibilitätsprüfung erfolgen. Beispiele für eindeutige Unplausibilitäten sind Fälle, bei denen Annahmen zum Abriss und zum Neubau zu Leerständen nahe Null oder im Extremfall zu „negativen Leerständen“ führen. Schwieriger ist das Aufspüren von Unplausibilitäten, die sich in der Struktur der Leerstandszahlen insgesamt sowie bei vergleichsweise hohen Leerstandsausprägungen ergeben. Hier können keine eindeutigen Werte benannt werden, deren Überschreitung die Plausibilität in Frage stellt. Hinweise hinsichtlich möglicher Unplausibilitäten liegen dann vor, wenn Leerstände Größenordnungen erreichen, die deutlich über das Maß der derzeit auf Gemeinde- und Kreisebene zu beobachtenden Leerstände hinausgehen. Kritisch wären auch deutliche Unstimmigkeiten zwischen der Struktur der zugrunde liegenden demografischen Entwicklungsdynamik und der sich abzeichnenden Leerstände in den unterschiedlichen Raumtypen. Tabelle 5-3 fasst die Ausprägungen des Wohnungsleerstandes, die sich unter den beschriebenen Basisannahmen für Zugang und Abgang in den Raumtypen ergeben, zusammen.

Tabelle 5-3: Resultierender Wohnungsleerstand der Basisvariante im Jahr 2020 in den Raumtypen

Resultierender Wohnungsleerstand der Basisvariante	Westdeutschland und Berlin			Ostdeutschland (ohne Berlin)		
	Raumtyp 1	Raumtyp 2	Raumtyp 3	Raumtyp 4	Raumtyp 5	Raumtyp 6
EZFH	3,2%	11,2%	5,0%	4,1%	12,8%	3,2%
MFH	6,3%	15,2%	7,7%	8,2%	17,1%	5,6%

Die in Tabelle 5-3 aufgeführten Werte weisen keine Unplausibilitäten auf. In Westdeutschland bleibt der modellierte Leerstand gegenüber der Situation im Ausgangsjahr 2005 stabil, in Ostdeutschland gehen die Leerstände mit Ausnahme von Raumtyp 5, wo ein moderater Anstieg zu verzeichnen ist, zurück. Die Ausgangsdaten bei Banse und Effenberger (2006) gehen davon aus, dass in Westdeutschland die Leerstände moderat ansteigen und in Ostdeutschland stabil bleiben. Allerdings nehmen sie die 10. Koordinierte Bevölkerungsvoraus-

berechnung als Grundlage. Deren Bevölkerungszahlen wurden mit der aktuell vorliegenden Vorausberechnung, die Grundlage des Konsistenzabgleichs ist, nach unten korrigiert. Leerstandsquoten in Einfamilienhausleerständen liegen in allen Raumtypen deutlich unter den Mehrfamilienhausleerständen. In städtischen Raumtypen sind die Unterschiede jedoch deutlicher ausgeprägt als in ländlichen Raumtypen. In allen Raumtypen liegen die Leerstände über dem „natürlichen Leerstand“⁵⁶. Auch weisen die Raumtypen keine Leerstände auf, die über vorstellbare Maximalausprägungen hinausgehen. Die Struktur der Leerstände spiegelt insgesamt die Struktur der demografischen Entwicklungsdynamik wider. Hohe Leerstandsausprägungen finden sich insbesondere in von Schrumpfung betroffenen Raumtypen wieder, deutlich geringere Werte treten in Raumtypen mit wachsenden Bevölkerungszahlen auf.

5.1.2.2 Variationen zur Überprüfung von Sensitivitäten

Prognostische Aussagen über zukünftige Entwicklungen sind in der Regel unsicherheitsbelastet. Dies trifft in besonderem Maße auch auf die hier herangezogenen Aussagen zu zukünftigen Wohnungszu- und -abgängen zu. Es ist nicht Ziel dieser Studie, möglichst verlässliche Wohnungsbestandsentwicklungsprognosen zu erstellen, sondern denkbare und vor allem plausible und konsistente Entwicklungsbilder zu zeichnen und Größenordnungen der zu erreichenden Ressourcenschonungspotenziale zu ermitteln. Die Annahmen zum Wohnungszugang und zum Wohnungsabgang werden daher einer Sensitivitätsbetrachtung unterzogen, um die im Annahmengerüst der Bestandsentwicklungsmodellierung innewohnenden Unsicherheiten auszuloten. Es wird geprüft, ob die Aussagen, die hinsichtlich potenziell erreichbarer Ressourcenschonungspotenziale bei einer angenommenen Grundentwicklungsvariante getroffen werden, bei Variation der beiden Größen Zugang bzw. Abgang (jeweils unter ceteris paribus-Bedingungen) Bestand haben.

Als erstes wird das Neubaupotenzial der vorliegenden Raumordnungsprognose (BBR 2006) als Wohnungszugang angenommen, bei sonst gleichbleibenden Annahmen zum Wohnungsabgang. Diese Variante wird im Folgenden mit „V1“ bezeichnet. Dabei wird das angegebene Neubaupotenzial entsprechend des oben beschriebenen Vorgehens in der Basisvariante in ein Neubaupotenzial durch Neubau umgerechnet. Tabelle 5-4 gibt einen Überblick über die Annahmen zum Zubau durch Neubau in der Variante V1 auf aggregierter Ebene (Ost/West) im Vergleich mit der Basisvariante. Das differenzierte Annahmengerüst, gegliedert nach Raumtypen und Haustypen (EZFH und MFH), ist der Anlage zu entnehmen, dasselbe gilt für das differenzierte Annahmengerüst von V2 (Tabelle 5-5).

Tabelle 5-4: Annahmen zum Wohnungszubau im Jahr 2020 in V1 in der Gegenüberstellung zur Basisvariante (Annahmen sind in Anlehnung an das in der Raumordnungsprognose 2005 angegebene Neubaupotenzial getroffen)

	Westdeutschland	Ostdeutschland
Zugang durch Neubau in V1 (WE/Jahr)	194.957	23.463
Abweichung zur entsprechenden Annahme der Basisvariante (%)	4,1 %	38,3 %

⁵⁶ 2 % in EFH, 3 % in MFH

Zweitens wird die Größe des Wohnungsabgangs, die sich in der jüngsten Bestandsentwicklung in der Statistik abzeichnet, auf die Wohnungsbestandsentwicklung bei sonst gleich bleibenden Annahmen zum Wohnungszugang bis zum Jahr 2020 hochgerechnet. Dabei werden die aktuellen Abgangsquoten bis zum Jahr 2020 konstant gehalten (s. hierzu Abschnitt 2.2.3.3). Diese Variante wird im Folgenden mit „V2“ bezeichnet. Tabelle 5-5 benennt die Annahmen zum Abgang von V2 auf aggregierter Ebene (Ost/West) und stellt diese der Basisvariante gegenüber.

Tabelle 5-5: Annahmen zum Wohnungsabgang im Jahr 2020 in V2 in der Gegenüberstellung zur Basisvariante (Annahmen sind in Anlehnung an die Quoten getroffen, die sich aus erfassten Wohnungsabgängen der jüngsten Entwicklung ermitteln lassen)

	Westdeutschland	Ostdeutschland
Wohnungsabgang in V2 (Wo/Jahr)	14.756	37.383
Abweichung zur entsprechenden Annahme der Basisvariante (%)	-76,7%	-25,2%

Die zugrundegelegte Basisvariante liegt in den Annahmen zum Zubau bis 2020 unter den Annahmen von V1, die sich an die Angaben der Raumordnungsprognose anlehnen. Die Unterschiede fallen insgesamt jedoch, insbesondere in Westdeutschland, moderat aus. In Ostdeutschland liegen die Zubauannahmen mit ca. 38 % dagegen deutlich über der Basisvariante. Deutlich unterscheiden sich aber die Annahmen der Basisvariante von den aktuell ausgewiesenen Abgangszahlen der Statistik. Insbesondere in Westdeutschland wird von deutlich höheren Abgangszahlen ausgegangen. Dies wird u. a. mit einer deutlichen Fehlerfassung der Abgangszahlen insbesondere in den alten Ländern begründet.

Unter den Annahmen von V1 und V2 erfolgt eine Überprüfung der resultierenden Bilder der Bestandsnutzung anhand der sich einstellenden Wohnungsleerstände (s. Tabelle 5-6). Die resultierenden Leerstandsquoten zeigen keine Unplausibilitäten.

Tabelle 5-6: Resultierender Wohnungsleerstand der Basisvariante im Jahr 2020 in den Raumtypen

Resultierender Wohnungsleerstand in den Varianten		Westdeutschland und Berlin			Ostdeutschland (ohne Berlin)		
		Raumtyp 1	Raumtyp 2	Raumtyp 3	Raumtyp 4	Raumtyp 5	Raumtyp 6
V1	EZFH	3,6 %	11,1 %	4,4 %	4,0	13,6	5,0 %
	MFH	7,2 %	15,1 %	6,8 %	7,8	18,1	9,2 %
V2	EZFH	4,2 %	11,5 %	6,6 %	5,7	14,9	4,4 %
	MFH	8,9 %	15,7 %	10,3 %	11,8	19,8	8,1 %

5.1.3 Gewerbegebäudebestandsentwicklung

Wie oben bereits ausgeführt, weicht die Vorgehensweise bei der die Modellierung der potenziellen Gebäudebestandsentwicklung von dem für den Wohnungsbestand angewendeten Verfahren ab. Die Gründe liegen in deutlich geringeren empirischen Kenntnissen über Dynamik im Gewerbebaubestand bzw. fehlenden Informationen zum Bestand selbst und des-

sen Belegung. Deshalb kann hier nur eine grobe Abschätzung unter Verwendung spezifischer Entwicklungskenngrößen erfolgen. Diese werden mit verfügbaren Bestandsdaten der entsprechenden demografischen Merkmale verknüpft, auf die sie sich beziehen, um so Hochrechnungen vorzunehmen. Dem liegen Annahmen bezüglich vorhandener Bezüge zwischen Bestandsentwicklung im Gewerbebaubestand und den demografischen Größen „Erwerbspersonen“ und „Bevölkerung“ zugrunde (s. Abschnitt 2.3.2).

Die Abbildung der mittelfristigen Entwicklung im Gewerbebaubestand erfolgt durch die Verknüpfung der Anzahl Erwerbspersonen mit den entsprechenden Entwicklungskenngrößen in der Ausdifferenzierung nach Gebäudearten. Daten zur Beschreibung der Anzahl Erwerbstätiger werden der aktuellen Raumordnungsprognose entnommen (BBR 2009). Die für das Jahr 2020 hochgerechneten Zugänge und Abgänge an Gewerbebauten sind in Tabelle 5-7 und Tabelle 5-8 dokumentiert.

Die Einschätzung langfristiger Bestandsveränderungen im Jahr 2050 erfolgt durch Hochrechnungen, die sich an der Entwicklung der Bevölkerungsanzahl insgesamt orientiert. Auch hier wird auf die Ausführungen und die gebildeten Kennzahlen aus Abschnitt 2.3.2 verwiesen. Das Ergebnis der Hochrechnungen für Zugänge und Abgänge vom Gewerbebauten dokumentieren Tabelle 5-9 und

Tabelle 5-10. Entsprechend der regionalen Differenzierung, die im Bereich Wohnen für 2050 vorgenommen wird, erfolgt auch hier eine Unterscheidung zwischen Ost und West. Eine weitere Ausdifferenzierung nach Raumtypen unterbleibt in der Langfristperspektive.

Tabelle 5-7: Annahmen zum Zugang an Gewerbebauten im Jahr 2020 (Gebäude/Jahr) (eigene Schätzung auf Grundlage der Anzahl Erwerbspersonen aus BBR (2009) und hypothetisch formulierter spezifischer Entwicklungskenngrößen)

Gebäudearten	Westdeutschland und Berlin			Ostdeutschland (ohne Berlin)		
	Raumtyp 1	Raumtyp 2	Raumtyp 3	Raumtyp 4	Raumtyp 5	Raumtyp 6
Anstaltsgebäude	146	95	273	57	14	12
Büro- und Verwaltungsgebäude	1.021	663	1.912	398	98	86
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	2.744	1.782	5.140	1.069	262	231
Fabrik- und Werkstattgebäude	1.763	1.145	3.302	687	168	148
Handels- und Lagergebäude	2.877	1.868	5.388	1.121	275	242
Hotels und Gaststätten	239	155	447	93	23	20

Tabelle 5-8: Annahmen zum Abgang an Gewerbebauten im Jahr 2020 (Gebäude/Jahr) (eigene Schätzung auf Grundlage der Anzahl Erwerbspersonen aus BBR (2009) und hypothetisch formulierter spezifischer Entwicklungskenngrößen)

Gebäudearten	Westdeutschland und Berlin			Ostdeutschland (ohne Berlin)		
	Raumtyp 1	Raumtyp 2	Raumtyp 3	Raumtyp 4	Raumtyp 5	Raumtyp 6
Anstaltsgebäude	146	95	273	57	14	12
Büro- und Verwaltungsgebäude	345	224	646	134	33	29
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	1.591	1.033	2.980	620	152	134
Fabrik- und Werkstattgebäude	822	534	1.539	320	79	69
Handels- und Lagergebäude	915	594	1.713	356	87	77
Hotels und Gaststätten	133	86	248	52	13	11

Tabelle 5-9: Annahmen zum Zugang an Gewerbebauten im Jahr 2050 (Gebäude/Jahr) (eigene Schätzung auf Grundlage der Bevölkerungszahl in 2050 aus BBR (2009) und hypothetisch formulierter spezifischer Entwicklungskenngrößen)

Gebäudearten	Westdeutschland und Berlin	Ostdeutschland (ohne Berlin)
Anstaltsgebäude	410	54
Büro- und Verwaltungsgebäude	2.667	355
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	7.182	954
Fabrik- und Werkstattgebäude	4.583	609
Handels- und Lagergebäude	7.523	1.000
Hotels und Gaststätten	615	82

Tabelle 5-10: Annahmen zum Zugang an Gewerbebauten im Jahr 2050 (Gebäude/Jahr) (eigene Schätzung auf Grundlage der Bevölkerungszahl in 2050 aus BBR (2009) und hypothetisch formulierter spezifischer Entwicklungskenngrößen)

Gebäudearten	Westdeutschland und Berlin	Ostdeutschland (ohne Berlin)
Anstaltsgebäude	342	46
Büro- und Verwaltungsgebäude	958	127
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	4.171	555
Fabrik- und Werkstattgebäude	2.188	291
Handels- und Lagergebäude	2.462	327
Hotels und Gaststätten	342	46

Tabelle 5-11: Vergleich der Schätzungen zum Zugang an Gewerbebauten in den Jahren 2020 und 2050 (prozentuale Veränderungen 2050 gegenüber 2020, gebäudebezogen)

Gebäudearten	Westdeutschland und Berlin	Ostdeutschland (ohne Berlin)
Anstaltsgebäude	-20 %	-35 %
Büro- und Verwaltungsgebäude	-26 %	-39 %
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	-26 %	-39 %
Fabrik- und Werkstattgebäude	-26 %	-39 %
Handels- und Lagergebäude	-26 %	-39 %
Hotels und Gaststätten	-27 %	-40 %

Tabelle 5-12: Vergleich der Schätzungen zum Abgang an Gewerbebauten in den Jahren 2020 und 2050 (prozentuale Veränderungen 2050 gegenüber 2020, gebäudebezogen)

Gebäudearten	Westdeutschland und Berlin	Ostdeutschland (ohne Berlin)
Anstaltsgebäude	-33 %	-45 %
Büro- und Verwaltungsgebäude	-21 %	-35 %
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	-26 %	-39 %
Fabrik- und Werkstattgebäude	-24 %	-38 %
Handels- und Lagergebäude	-24 %	-37 %
Hotels und Gaststätten	-27 %	-39 %

5.2 Modellannahmen zur Berechnung der potenziellen RC-Stoffströme und Ressourcenschonungspotenziale

Wie aus den vorausgegangenen Abschnitten hervorgeht, bedarf es zur Ableitung von Potenzialen der Ressourcenschonung aus der Verwertung von mineralischen Bauabfällen vom Hochbau im Hochbau der Verknüpfung von Outputströmen aus dem Rohstofflager Gebäudebestand und dem von der Baustoffnachfrage induzierten Inputstrom.

Ob und wie viel vom Bauabfalloutput zum Baustoffinput wird, ist dabei nicht allein von technischen Prozessen und Zulassungsregelungen, sondern von zahlreichen weiteren, das Marktgeschehen zusätzlich bestimmenden Einflussfaktoren abhängig. Dazu können, unabhängig von den realen Bedürfnissen, marktfördernde (z. B. ein besonderes Ökologiebewusstsein) aber auch markthemmende Einflüsse (z. B. bestimmte Negativerfahrungen oder Vorbehalte) zählen. Einschränkungen die hieraus auf die Verwertung mineralischer Baustoffmassen in Betonanwendungen des Hochbaus entstehen können, sind als Potenzialgrenzen zu sehen, die es bei der Bestimmung der Ressourcenschonung nach Möglichkeit zu berücksichtigen gilt. Demgemäß ist auch die gesamte Prozesskette, vom Abgang des gebrauchten Baumaterials aus dem Baustofflager bis zur Nutzung als Sekundärbaustoff eingehend zu betrachten und hinsichtlich der den Materialfluss verändernden Einwirkungen zu durchleuchten. Die Praxis von Bauabfallaufbereitung, Baustoffherstellung und des Baubetriebs sowie das Normenwerk und einschlägige baustoffliche Forschungsarbeiten liefern

dafür Eckdaten, auf deren Grundlage wesentliche Einflüsse auf die relevanten Masseströme in groben Zügen nachgezeichnet werden können. Hierdurch nicht zu erfassen sind zahlreiche andere Mechanismen, z. B. ausgelöst durch lokale Rohstoff- und Verwertungskonkurrenz, Transportbedingungen und nicht zuletzt auch psychologische Faktoren wie bspw. dem Ruf eines Produktes, Einstellungen, vorherrschende Erfahrung oder Sicherheitsempfindungen welche ebenfalls von Einfluss sind und dadurch eine Wirkung auf die erzielbare Rohstoffsubstitution haben. Während sich aus aufbereitungstechnischen Daten, Zulassungsregelungen und anderen baustofftechnologischen Informationen die Masserelevanz in Bezug auf das Verwertungsergebnis leicht erschließt, ist eine verlässliche quantitative Bewertung der Einflusshöhe sonstiger Faktoren in der vorliegenden Arbeit nicht möglich. Dies schließt beispielsweise auch ein, dass mögliche Veränderungen im Bereich der Aufbereitungstechnik aufgrund der starken Einflüsse, die hierzu vom Markt auf die Entwicklungen ausgehen, nicht abgebildet werden können und pauschale Annahmen zugrunde gelegt werden müssen.

Vor diesem Hintergrund wurde, gestützt durch eine mit Fachvertretern verschiedener Kompetenzbereiche zur Analyse der Potenzialgrenzen geführte Diskussion, das technisch umsetzbare Potenzial zur Rohstoffsubstitution als Zielwert für die Modellbildung definiert.

Eine dabei vorgenommene modellrelevante Festlegung besteht darin, die heutige Aufbereitungstechnik als im Grundsatz geeignet für die Erzeugung von betonfähigen RC-Gesteinskörnungen anzusehen, und aus Defiziten in der Verbreitung bzw. Nutzung der entsprechenden Technik ebenfalls keine Einschränkung für die potenziell erzeugbaren Betonzuschlagsmengen abzuleiten. Diese Annahme gilt es im Hinblick auf die bereits in den Abschnitten 4.2 und 4.3 hervorgehobenen Tatsachen zu betonen, wonach z. B. die weitaus größere Zahl derzeit zur Bauabfallaufbereitung eingesetzter Anlagen mobiler bzw. semimobiler Natur sind, denen es in aller Regel an den notwendigen technischen Voraussetzungen mangelt, um aus baustellenüblichen mineralischen Abfallgemischen Gesteinskörnungen in der für Betonanwendungen erforderlichen Qualität erzeugen zu können. Ein weiterer Kontrastpunkt zur getroffenen Annahme ist, dass auch Anlagen zur Nassaufbereitung, die nachweislich die besten Möglichkeiten zur Herstellung hochwertiger Gesteinskörnungen aus Bauschuttmaterial bieten (Müller 2006, Österreichisches Ökologie-Institut für angewandte Umweltforschung 2004) in Relation zur Anzahl und Verbreitung von Anlagen mit trockener Aufbereitung im Rückgang begriffen sind (Jungmann et al. 1997). Als wesentlicher Auslöser hierfür sind die höheren Aufwendungen zum Betrieb dieser Anlagen im Vergleich zur trockenen Aufbereitung, insbesondere resultierend aus dem Wassereinsatz, der Notwendigkeit zur Einrichtung einer Wasserkreislaufführung und Schlammaufbereitung und erforderlichen Genehmigungsprozeduren zu benennen. Demgegenüber trägt die Absatzsituation wenig zur Kompensation der erhöhten Kosten bei.

Mit Erwähnung dieser nachteiligen Sachverhalte wird klar, dass die dem Berechnungsmodell innewohnende Annahme, für Bauschutt der geeigneten Materialart würde immer die zur Erzeugung von Betonzuschlagstoff benötigte Aufbereitungstechnik verfügbar sein, eine erhebliche Vereinfachung der momentanen Realitäten darstellt. Dies unterstreicht nochmals die letztlich nur theoretischen Aussagemöglichkeiten über die Ressourcenschonungspotenziale durch Primärrohstoffsubstitution. Im Hinblick auf bestehende Marktregeln scheint es indes nicht unangemessen, davon auszugehen, dass eine auskömmliche Absatzlage für

rezyklierte Betonzuschläge zum Entstehen ausreichender und qualitativ hinreichender Aufbereitungskapazitäten führen würde. Forschungsergebnisse zeigen, dass Techniken, mit denen gegenüber gängigen Anlagenkonfigurationen deutliche Fortschritte bei der Erzeugung von rezyklierten Gesteinskörnungen mit den für Betonzuschlägen notwendigen Eigenschaften erzielt werden könnten, bereits existieren und erprobt sind. Neben den Vorteilen der Nasswäsche kommen hier unter anderem Impulskerkerer sowie optoelektronisch unterstützte und Dichtesortierverfahren zur Nennung (u. a. Schmidt Consult 1999, Müller 2004).

Eine weitere, im Zuge der Modellumsetzung verfügte Annahme betrifft die Gleichbehandlung von Betonen für unterschiedliche Expositionsklassen⁵⁷ im Hinblick auf die zulässigen Einsatzanteile an rezyklierten Gesteinskörnungen. Nach DAfStb-Richtlinie für Beton mit rezyklierten Zuschlägen sind für Betone des überwiegend trockenen Anwendungsbereiches gegenüber Betonen mit vorwiegend nasser Exposition über alle verwendbaren Liefertypen hinweg höhere Einsatzanteile zulässig (siehe Tabelle 5-13). Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass für Innenbauteile aus Beton pro Kubikmeter mehr Rezyklat zur Verwendung kommen darf als im Falle von Außenbauteilen. Da Wohn- und Gewerbebauten die Bezugsebene für diese Studie darstellen, wird diese Unterscheidung im Modell nicht zur Anwendung gebracht. Vielmehr wird der Überlegung folgend, dass beim heutigen und zukünftigen Bauen an Wohn- und Gewerbebauten Isolations- und Dämmfordernisse bestehen, die eine Differenzierung nach Innen- und Außeneinsatz überflüssig werden lassen, für alle Betonanwendungen des Hochbaus der maximal mögliche Einsatzanteil an Rezyklat (d. h. 45 Vol.-% des Zuschlagsanteils im Beton, bzw. 35 Vol.-% bei höherem Ziegelanteil) zum Ansatz gebracht.

Im Hinblick auf die Fülle an durchgeführten Versuchen zur Betonsicherheit bei Einsatz von Rezyklaten und die dabei gewonnenen Erkenntnisse stellt auch dieser Ansatz noch ein eher restriktives Vorgehen dar. So werden unter gewissen Voraussetzungen Ersatzanteile von 90 % und mehr für die zur Betonherstellung benötigten Gesteinskörnungen durch Rezyklat inzwischen als technisch vertretbar eingestuft⁵⁸, noch stärker generalisiert wird auch von bis zu 50 % Ersatz des Gesteinskörnungsanteils durch Rezyklat ohne Einschränkung der Betonqualität gesprochen (Schießl 2008). Auch der Weg der Einzelzulassung beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) hat in der Vergangenheit bereits den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen mit über den vorgenannten Begrenzungen liegenden Anteilen, so u. a. auch im Rahmen von Demonstrationsprojekten des Hochbaus, ermöglicht (Tabelle 5-13).

⁵⁷ Expositionsklassen nach EU-Norm: xc 1: trocken oder ständig nass, xc 2: nass, selten trocken, xc 3: mäßige Feuchte, xc 4: wechselnd nass und trocken

⁵⁸ Ausführungen zum unveröffentlichten Teil 2 der DAfStB-Richtlinie für Beton mit rezykliertem Zuschlag in Abschnitt 4.3.

Tabelle 5-13: Beispiele für Betonanwendungen des Hochbaus unter Einsatz von rezyklierten Zuschlägen (Quelle: Weil, M. 2004, Buchgeister, J. 2005)

	Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen		
	BIM-Projekt: Hundertwasserhaus Darmstadt	Gesundheitshaus Münster	Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen
Beton	1	2	3
Gemäß	DAfStb/DIN	DAfStb/DIN	Einzelzul./DIN
Druckfestigkeitsklasse	C20/25	C20/25	C20/25
Ausbreitklasse	F3 (weich)	F3 (weich)	F3 (weich)
Expositionsklasse	XC1	XC1	XC1
Sieblinie (Größtkorn)	(32)		A/B32
Vol.-% RC-Gesteinsk.	35	35	50

Da der Weg der Einzelzulassung ein insgesamt sehr aufwendiger, und mit großpraktischen Bau- und Prüfungsabläufen vorerst noch schwer vereinbarer Weg ist, in dessen Konsequenz es ggf. auch zu einer stärkeren Bauteilbemessung, und damit einem wiederum erhöhten Gesamtmaterialeinsatz kommen kann, findet diese Option im Ressourcenschonungsmodell keine Berücksichtigung. Eine Modellierung unter Annahme höherer Einsatzanteile, als durch das DAfStB-Regelwerk vorgegeben, wurde demnach zwar nicht vorgenommen, gibt aber einen Hinweis auf eine jener Stellschrauben im Modell, über die sich weitere Optimierungspotenziale ergeben könnten. Beispielsweise könnte ermittelt werden, mit welchen Einsatzanteilen an RC-GK eine vollständige Abschöpfung von Überhangsmassen an RC-Zuschlagsstoffen theoretisch herbeiführbar wäre.

Wie im Abschnitt 4.5 ausgeführt, vollzieht sich die rechnerische Modellierung der RC-Stoffströme und daraus hervorgehende Ableitung von Ressourcenschonungspotenzialen über die in den Abschnitten 4.1-4.3 umrissenen Bereiche Erfassung, Aufbereitung und Einsatz, wobei die oben für die Modellbildung erläuterten Grundannahmen zu reflektieren sind. Teil dessen ist die Bildung von Eingangszahlenwerten für die vorzunehmenden Berechnungen.

Im Folgenden werden die jeweiligen Einzelwerte vorgestellt, die den Modellrechnungen zugrunde liegen.

Tabelle 5-14: Im Berechnungsmodell verwendete materialspezifischen Festgrößen

Rohdichten von betrachteten Materialfraktionen		Betonrezyklat: 2.320 kg/m ³		
		Ziegelrezyklat: 1.830 kg/m ³		
		Naturkies: 2.650 kg/m ³		
Gesteinskörnungsanteil im Beton		0,72 m ³ Gesteinskörnung / m ³ Beton		
Dichtebasierte Zusammensetzung der betrachteten RC-GK	Liefertyp (Verhältnis GK-Anteil Beton : GK-Anteil Ziegel)	Gesamtrohdichte der Mischung	davon entfallen auf	
			Beton-GK	Ziegel-GK
	Liefertyp L* (100 : 0)	2.320 kg/m ³	2.320 kg/m ³	0
	Liefertyp L1 (90 :10)	2.259 kg/m ³	2.033 kg/m ³	226 kg/m ³
	Liefertyp L2 (70 : 30)	2.147 kg/m ³	1.503 kg/m ³	644 kg/m ³

Ein im Modell zusätzlich zur Liefertypenzulassung nach DAfStB berücksichtigter Sonderfall ist die Ausweisung einer Gesteinsmischung, die ausschließlich rezyklierten Betonsplitt (Verhältnis Beton zu Ziegel 100:0) umfasst. Sie ist für die Modellbetrachtungen mit der Bezeichnung Liefertyp L* versehen. Eine solche Zusammensetzung mit einzubeziehen, zielt darauf ab, festzustellen, wie sich Angebots- und Nachfrageseite zueinander unter dem Blickwinkel verhalten, dass Betonhersteller den Einsatz von Rezyklat unter Ausschöpfung der höchstmöglich zulässigen Grenzen nur für den Fall eines völlig reinen Zuschlagsstoffes auf Betonbasis vornehmen.

Durch diese Betrachtungsperspektive wird die Tatsache aufgegriffen, dass rezyklierte Gesteinsmischungen in Form des Liefertyps L2 bislang grundsätzlich nicht als Betonzuschlagstoffe Einsatz finden, und eingesetzten RC-Lieferkörnungen des Typs L1 dem Vernehmen nach fast ausschließlich die Aufbereitung von Betonmonochargen zu Grunde liegen soll. Es ist somit am naheliegendsten, dass eine sich vergrößernde Bereitschaft der Betonhersteller Rezyklat als Zuschlagsstoffe zu verwenden, seinen Weg ebenfalls vom Ende der höchsten Gesteinskörnungsqualität nimmt, d. h. eine sukzessive Abschöpfung der Rezyklatmengen, beginnend beim reinen Betonsplitt erfolgt. Durch Beschränkung des Blicks auf den "idealierten" Liefertyp L* wird ein Bild geschaffen, welches in etwa gegenwärtige Verhaltensweisen beim Betonrecycling simuliert.

Zur Festlegung der Eingangszahlenwerte für die Parameter Erfassbarkeit und Ausschleusung im Teilmodell RC-Stoffströme wird prinzipiell auf die Ausführungen und Wertebereiche in den Abschnitten 4.1 und 4.2 zurückgegriffen. Mit dem Eingangswert 80 % sortenrein erfassbarer Anteil an der Gesamtausgangsmasse Beton und Ziegel des abgehenden Gebäudebestandes wird dabei ein grober Schätzwert angesetzt, der bei den dazu geführten Expertengesprächen als konsensfähig betrachtet wurde, aber dennoch weiterer Verifizierung bedarf. Diesem Werteparameter gilt von daher auch besondere Aufmerksamkeit als eine primäre Stellgröße für die Veränderung der RC-Stoffströme, vorzugsweise in Richtung einer optimierten Erfassung durch weitere Erhöhung der Selektivität beim Gebäuderückbau und bei der Bildung von Abbruchfraktionen. Die Vergrößerung der Bereitstellungsmenge an geeigneten Ausgangsmaterialien für Betonzuschläge bildet einen wesentlichen Ansatzpunkt, um in Regionen mit hohem Nachfragepotenzial an RC-GK eine Bedarfsdeckung zu erreichen und damit bestehende Ressourcenschonungspotenziale voll ausschöpfen zu können. Der Ansatz wird in der zweiten Optimierungsebene des Ressourcenschonungsmodells (siehe

Kapitel 6.3) durch eine Erhöhung der Erfassungsquote modellhaft zur Anwendung gebracht. Dabei soll betrachtet werden, inwieweit es durch eine Steigerung des Erfassungsanteils auf 90 % möglich wäre, regional bestehende Mangelsituationen an RC-Ausgangsmaterial auszugleichen, wobei 10 % nicht erfassbarer Materialanteil dann auch unter Anwendung aller technischen Möglichkeiten als nicht mehr zu unterbietender Wert angesehen wird.

Hinsichtlich der Ausschleusungsmenge an Anlageninput im Ergebnis der Rezyklataufbereitung werden unter Bezugnahme auf den Wertekorridor des anwendbaren Sieblinienspektrums (Abbildung 5-2, [③ = günstiger Bereich, ④ = brauchbarer Bereich]) für gebräuchliche Gesteinskörnungen bis 32 mm Korndurchmesser 40 Masseprozent als Eingangszahlenwert zum Ansatz gebracht. Dies entspricht in etwa dem Absiebanteil bei der Zulässigkeitsgrenze von 2 mm Korngröße für den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen zur Betonherstellung. Obgleich ein Optimierungspotenzial durch den an der Absiebgrenze von 2 mm noch nach unten bestehenden Wertekorridor auch hier gegeben scheint, wird eine Erhöhung der potenziellen Bereitstellungsmenge an RC-GK durch Veränderung dieser Stellgröße nicht modelliert. Diese Entscheidung stellt auf den in Kapitel 5.2 ausgeführten Aspekt der Anreicherung betonschädlicher Stoffe in der Feinfraktion ab, demzufolge eine Absiebung eher bei einem Korndurchmesser oberhalb von 4 mm empfohlen, und in der Praxis momentan sogar oft erst bei 8 mm praktiziert wird.

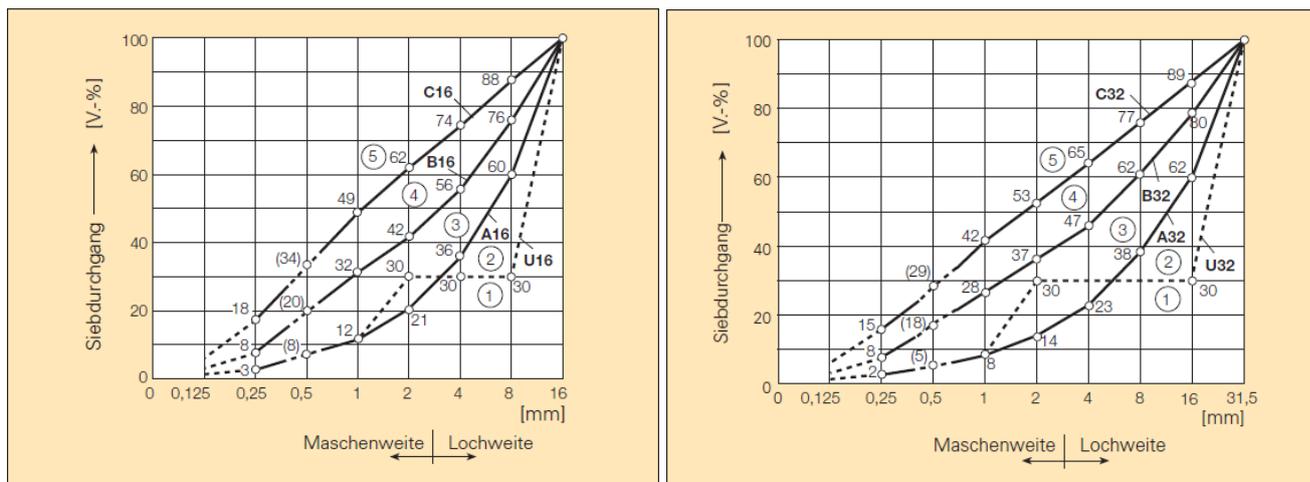


Abbildung 5-2: Siebliniendiagramme für Sieblinien nach DIN 1045-2 für Gesteinskörnungen mit 16 bzw. 31,5 mm Größtkorn (Quelle: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. 2004)

Bei den Eingangswerten für die zulässigen Anteile rezyklierten Zuschlags im Beton wird aus den bereits angeführten Gründen auf die Festlegungen der DAfStB-Richtlinie orientiert.

Tabelle 5-15: Für das Berechnungsmodell verwendete Annahmen zur Erfassbarkeit, Ausschleusung sowie den zulässigen Beimischungsanteilen an RC-GK

Wertparameter	Eingangswert	Optimierungsansatz
Erfassbarkeit (Anteil des Anlageninputs am Baustoff-Ausgangsstrom)	80 %	90 %
Ausschleusung (Vom Anlageninput ausgeschleuster Masseanteil)	40 %	40 %
Zulässiger Einsatzanteil bei Liefertyp L*	45 %	45 %
Zulässiger Einsatzanteil bei Liefertyp L1	45 %	45 %
Zulässiger Einsatzanteil bei Liefertyp L2	35 %	35 %

Ausgehend von den stofflichen Kennwerten und Zulässigkeitsanteilen im Beton lässt sich die materialspezifisch einbringbare Masse an Rezyklatmaterial in den Zubaubeton bestimmen.

Tabelle 5-16: Für das Berechnungsmodell verwendete Annahmen zu den Anteilen an RC-Baustoffen im Zubaubeton

RC-Material einer bestimmten Stoffgruppe im Zubaubeton in kg pro m ³ Beton		
Liefertyp	Beton	Ziegel
L* (100 % Beton - Gesteinskörnungen)	751,68	0
L1 (90% Beton-GK : 10% Ziegel-GK)	658,69	73,22
L2 (70% Beton-GK : 30% Ziegel-GK)	378,76	162,29

Je nach Ausgangsdichte und berücksichtigtem Korngrößenspektrum für den Ersatzanteil bzw. der verwendeten Betonrezeptur liegen aus Forschung, Literatur und Praxis unterschiedliche Größenordnungen vor, gegenüber denen sich die für das Modell verwendeten Werte reflektieren lassen (Abbildung 5-3). Unter dem Blickwinkel höchstmöglicher Verwertungsraten von RC-Material durch Einsatz als Betonzuschlagstoff wurden für die Modellbetrachtungen im Rahmen dieser Studie auf Werte in Anlehnung an Weil und Jeske (2004) zurückgegriffen. Diese stellen im Vergleich zu den nachfolgenden Angaben aus verschiedenen Praxisvorhaben eine bereits weitestgehend optimierte Sichtweise auf den Einsatz von RC-Material als Betonzuschlagstoff im Rahmen der bauaufsichtlichen Zulässigkeitsgrenzen dar.

Festigkeitsklasse	C 8/10	C 12/15	C 12/15	C 20/25
Konsistenz	C1	C1	F3	F3
Expositionsklasse	X0	X0	X0	XC1/XC2
Rezepturzusammensetzung [kg]				
Zement*	155 + 25 Asche	210	260	310
Wasser	139,5	168	195	192,2
0-2 mm Natursand	650,94	622,81	590,88	576,59
2-8 mm Naturkies				270,28
Betongranulat	512,43	490,28	465,15	226,95
8-16 mm Naturkies				144,15
Betongranulat	649,08	621,02	589,19	453,9
Massenanteil RC-Gesteinskörnung	68,0%	68,0%	68,0%	45,0%

*CEM II/B-V42,5R und CEM IV/B-V 32,5R

Festigkeitsklasse	C 25/30	C 25/30 wu	C 30/37	C 35/45
Konsistenz	F3	F3	F3	F3
Expositionsklasse	XC4/XF1, XA1 bei Ü2)	XC4/XF1, XA1 bei Ü2)	XC4/XA1/XD1, XM1	XC4/XF2/XA2/XD2, XM2
Rezepturzusammensetzung [kg]				
Zement*	330	340	360	360
Wasser	191,4	180,2	187,2	172,8
0-2 mm Natursand	574,18	579,32	566,02	575,62
2-8 mm Naturkies	358,86	362,08	353,76	359,77
Betongranulat	150,67	152,02	148,53	151,05
8-16 mm Naturkies	233,26	235,35	318,38	413,73
Betongranulat	376,67	380,04	297,05	226,57
Massenanteil RC-Gesteinskörnung	35,0%	35,0%	30,0%	25,0%

*CEM II/B-V42,5R und CEM IV/B-V32,5R; CEM II/B-V52,5R

Abbildung 5-3: Im laufenden Demonstrationsvorhaben Ludwigshafen entwickelte Rezepturen für verschiedene Versuchsbetone mit Rezyklatanteil (Quelle: Mettke 2009)

	<i>Beton mit rezykliertem Zuschlag</i>		
	<i>BIM-Projekt: Hundertwasserhaus Darmstadt</i>	<i>BIM-Projekt: Gesundheitshaus Münster</i>	<i>Beton mit Recycling-Zuschlag (Herstellerrangaben)</i>
<i>Beton</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Festigkeitsklasse DIN	B25	B25	B25
Konsistenz	KR	KR	KR
Verwendung	Innenbauteil	Innenbauteil	Innenbauteil
<i>Zusammensetzung pro m³ Beton</i>			
Zement (CEM I)	280 kg	340 kg	240 kg
Flugasche	60 kg	70 kg	80 kg
Natur-Zuschlag	1196 kg	1129 kg	878 kg
Recycling-Zuschlag	581 kg	528 kg	840 kg
Betonverflüssiger	1,4 kg	1 kg	1,2 kg
Wasser	180 kg	187 kg	186 kg
Gesamtgewicht	2298,4 kg	2255 kg	2225,2 kg

Abbildung 5-4: Aus bisherigen Demonstrationsvorhaben bekannte Rezepturen für Betone mit Rezyklatanteil (Quelle: Weil, M.; Jeske, U.; Schebek, L. 2002)

6 Ressourcenschonungspotenzial

6.1 Regionalisierte Stoffströme recyclingrelevanter Baustoffe

6.1.1 Stoffströme recyclingrelevanter Baustoffe im Jahr 2020

Unter Annahme der in Abschnitt 5.1.2.1 beschriebenen Basisvariante der Bestandsentwicklung bis zum Jahr 2020 errechnen sich die in Abbildung 6-1 dargestellten Stoffströme recyclingrelevanter Baustoffe. Für Deutschland insgesamt ist demnach zu erwarten, dass das Stofflager recyclingrelevanter Baustoffe im Gebäudebestand weiter ansteigt. Die Massen der Zugänge an Betonen übersteigen die Summe der abgehenden Betone und Ziegel deutlich.

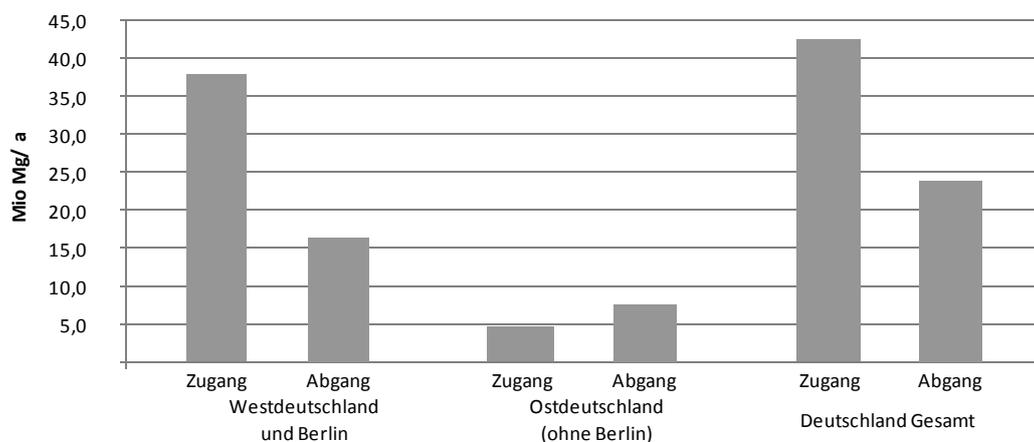


Abbildung 6-1: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau nach Herkunft in 2020

Überschlägig kann dieser abgehende Stoffstrom, der sich für Gesamtdeutschland errechnet, einer Plausibilitätsprüfung unterzogen werden, um die Treffgenauigkeit der Modellrechnung und der zugrunde liegenden Annahmen zu belegen. In der vorgenommenen Modellrechnung für das Jahr 2020 ist der abgehende Stoffstrom recycling-relevanter mineralischer Rohstoffe mit 23,7 Mg/a beziffert. Derzeit, bezogen auf das Jahr 2004 und die Gesamtmasse aller abgehenden Baustoffe, wird von einer Menge von 50,5 Mio. Mg Bauschutt im Jahr berichtet. Davon entfallen 31 Mio. Mg auf Bauschutt aus Abrissmaßnahmen (KWTB 2007). Hierunter fallen alle mineralischen Fraktionen, die im Zuge der Abrissmaßnahmen anfallen, wie Betone, Ziegel, weitere Mauersteine, Fliesen und Keramik. Der Anteil an Betonen und Ziegel am Bauschutt insgesamt kann in Anlehnung an vorliegende Untersuchungen über die Zusammensetzung von Bauschutt (Diedrich et al. 2001, Technische Hochschule Darmstadt 1998, Intecus 1999) mit rund 70 Gew.-% angenommen werden. Hieraus berechnet sich ein Anfall an Betonen und Ziegel im Bauschutt aus Abbruchmaßnahmen in Höhe von rund 20 Mio. Mg. Diese Menge zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der in der Modellrechnung für das Jahr 2020 berechneten Menge. Angesichts dessen, dass die für das Jahr 2020 angenommenen Bestandsveränderungen wenig von den gegenwärtig postulierten Verhältnissen

abweichen⁵⁹, kann aufgrund dieser Übereinstimmung die vorgelegte Hochrechnung als gute Annäherung eingestuft werden.

Das Bild der Stoffströme recyclingrelevanter Baustoffe stellt sich bei regionalisierter Betrachtung deutlich facettenreicher dar. Dies zeigt sich bereits in der Ausdifferenzierung der Größen nach neuen und alten Ländern. Während in den alten Ländern das Übergewicht der Zugänge gegenüber den Abgängen noch stärker ausgeprägt ist, kehrt sich dieses Bild in den neuen Ländern ins Gegenteil um. Hier dominieren die abgehenden Baustoffmassen die Gesamtstoffströme recyclingrelevanter Baustoffe

Der Stoffstrom recyclingrelevanter Baustoffe resultiert zum Großteil aus der Wohnungsbestandentwicklung (Abbildung 6-2). 71% des Zugangs geht in Deutschland in den Wohnungsbestand und zwei Drittel des Abgangs entstammt dem Wohnungsbestand. Auch hier unterscheiden sich die Verhältnisse zwischen Ostdeutschland und Westdeutschland. So beträgt der Anteil des Gewerbes beim berechneten Abgang in Ostdeutschland lediglich 15%, in Westdeutschland dagegen 43%. Beim Zugang sind die Verhältnisse in abgeschwächter Form umgekehrt zu beobachten.

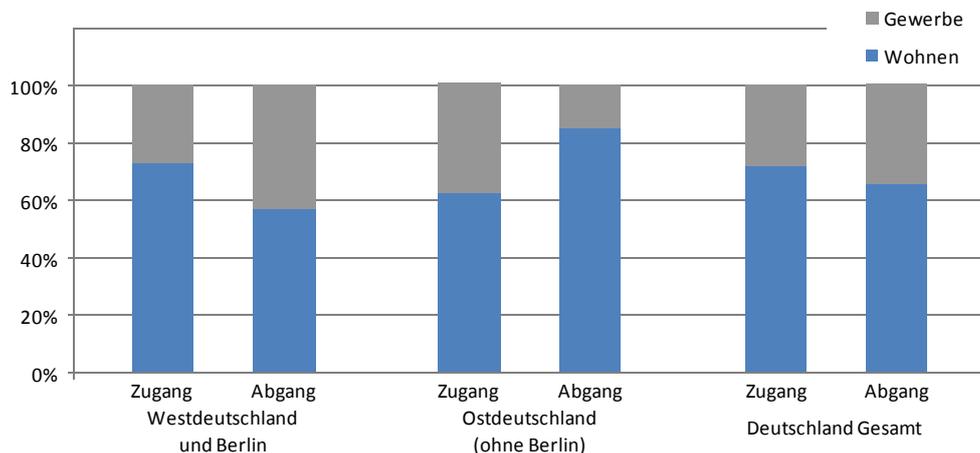


Abbildung 6-2: Anteile von Wohnen und Gewerbe am Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2020

Der zugehende Strom recyclingrelevanter Baustoffe im Sinne dieser Studie besteht zu 100 % aus Normalbetonen, der abgehende Strom setzt sich aus den Fraktionen Beton und Ziegel zusammen. Hier dominiert deutlich der Baustoff Beton. Der berechnete Massenanteil an Ziegeln am Gesamtstrom angehender Baustoffe liegt bei 27 bis 28 Massenprozent (Abbildung 6-3).

Erfolgt die Regionalisierung der berechneten Stoffflüsse auf der Ebene der Raumtypen, verschärfen sich die Disparitäten, die in der Ausdifferenzierung nach Ost- und Westdeutschland bereits deutlich werden (Abbildung 6-4). In den drei Raumtypen, denen die westdeutschen Landkreise zugeordnet sind, dominiert jeweils der zugehende Stoffstrom an Betonen die Gesamtmasse recyclingrelevanter Baustoffströme in und aus dem Gebäudebestand. Am deutlichsten tritt diese Dominanz im Raumtyp 3 zu Tage, der suburbane Kreise und ländliche

⁵⁹ sofern die von Banse und Effenberger (2006) unterstellte Fehlerfassung von Abrissen insbesondere für Westdeutschland zutrifft

Kreise mit größerer Dynamik in Westdeutschland repräsentiert. Hier liegt das Verhältnis aus Inputmassenstrom zu Outputmassenstrom recyclingrelevanter Baustoffe bei 2,6. In den ostdeutschen Raumtypen zeigt sich ein differenzierteres Bild. In den zu Raumtyp 4 zugeordneten Kernstädten sowie in den als dünn besiedelt, häufig peripher eingestuft Kreisen (Raumtyp 5) zeigt sich eine deutliche Dominanz des Abgangs recyclingrelevanter Baustoffe gegenüber dem Zugang am betrachteten Gesamtmassenstrom. Diese Dominanz des Abgehenden ist am stärksten in Raumtyp 5 ausgeprägt. Hier zeigt sich ein Verhältnis Zugang zu Abgang von 0,4. Die zu Typ 6 zusammengefassten Umlandkreise von Berlin bzw. Kernstädte mit Suburbanisierungstendenzen in Ostdeutschland zeigen dagegen ein Profil auf, das dem der Raumtypen Westdeutschlands ähnlich ist.

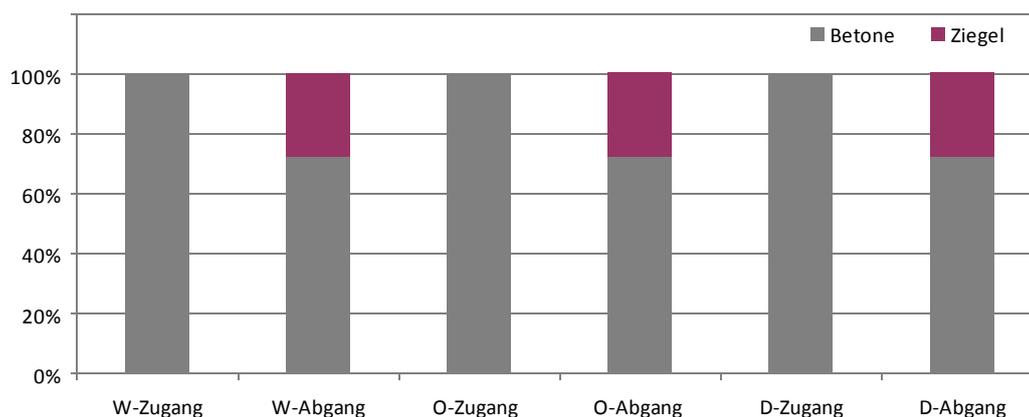


Abbildung 6-3: Anteile von Betonen und Ziegel am Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2020 (W: Westdeutschland, O: Ostdeutschland, D: Deutschland gesamt)

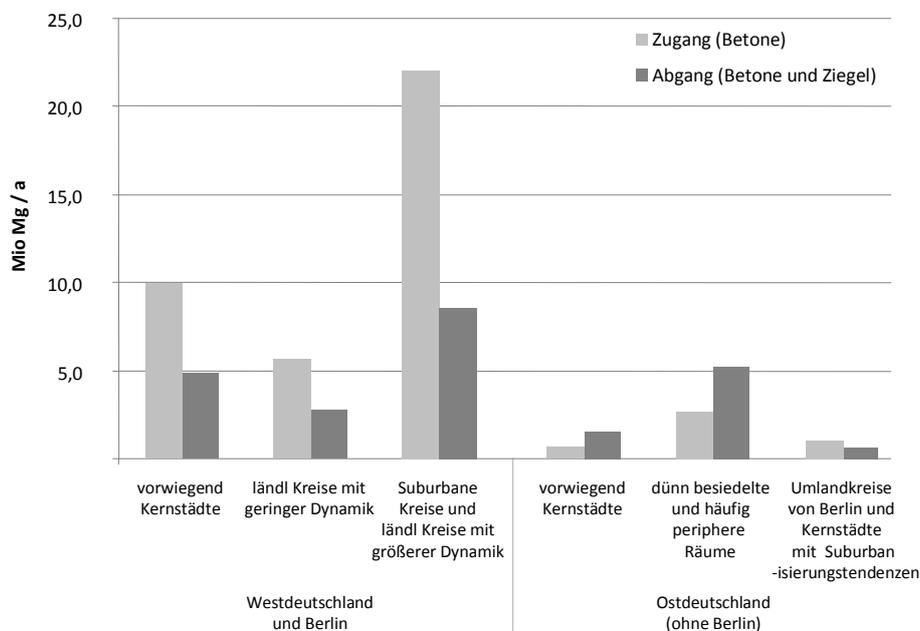


Abbildung 6-4: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in den Raumtypen im Jahr 2020

In nachfolgender kartografischer Darstellung des Verhältnisses von Input- zu Outputstrom recyclingrelevanter Baustoffe sind die beschriebenen regionalen Disparitäten deutlich hervorgehoben (Abbildung 6-5).

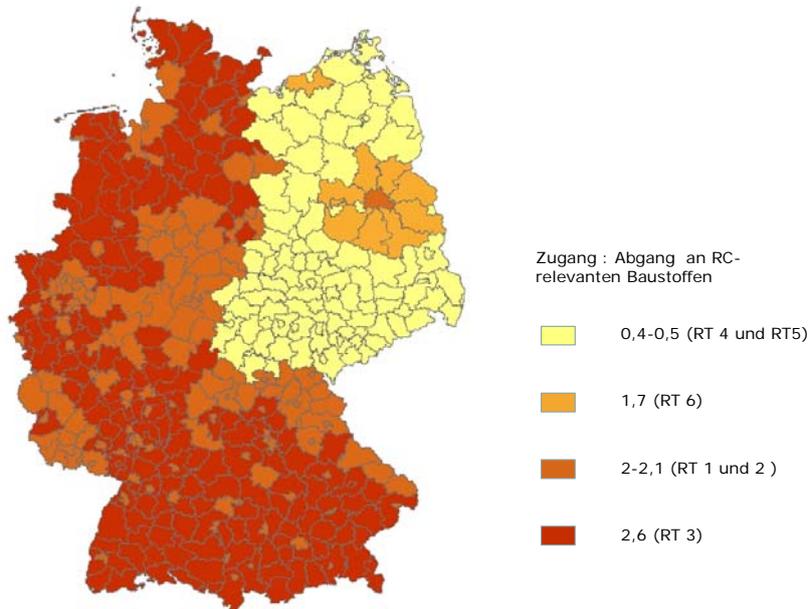


Abbildung 6-5: Räumlicher Niederschlag der Bilanz aus Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau (Wohnen und Gewerbe) auf der Ebene der Raumtypen im Jahr 2020

6.1.2 Langfristige Entwicklung der Stoffströme recyclingrelevanter Baustoffe

Langfristig wandelt sich das Bild der Verhältnisse der Zu- und Abgangsströme recyclingrelevanter Baustoffe. Während die Verhältnisse in Ostdeutschland vergleichsweise stabil bleiben, drehen sie sich in Westdeutschland ins Gegenteil um. So weisen die Modellrechnungen unter den in Abschnitt 5.1 dargelegten Annahmen zur langfristigen Bestandsentwicklungsdynamik für das Jahr 2050 auch in Westdeutschland eine deutliche Dominanz abgehender Massen am Gesamtmassenstrom recyclingrelevanter Baustoffe auf, wie sie in Ostdeutschland bereits für das Jahr 2020 aufgezeigt werden können (Abbildung 6-6).

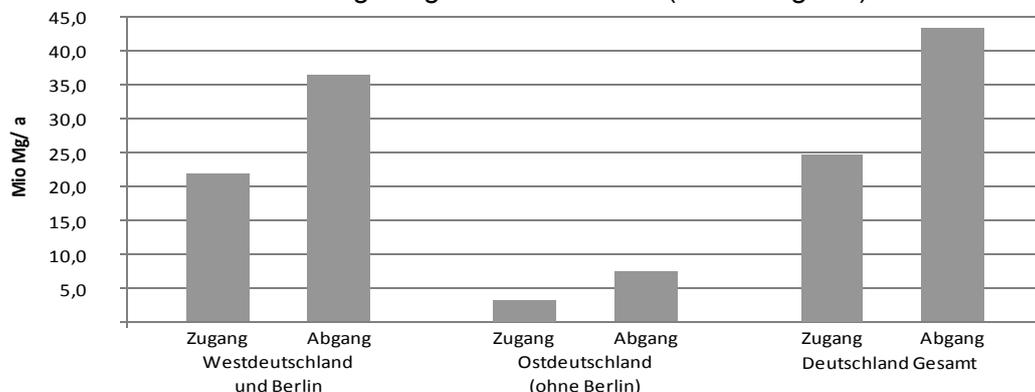


Abbildung 6-6: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2050

6.2 Angebot und Nutzmenge von Recyclinggesteinskörnungen

6.2.1 Bereitstellungspotenzial

Das Bereitstellungspotenzial drückt aus, wie viel für den Betonbau einsetzbares Rezyklatmaterial sich aus mineralischem Hochbauabfall zur Verfügung stellen lässt (s. Abschnitt 4.5). Es kann deshalb auch als potenzielles Angebot an Recyclinggesteinskörnungen bezeichnet werden. Dieses wird im Stoffstrommodell aus den Stoffströmen abgehender recyclingrelevanter Baustoffe ermittelt, indem diese rechnerisch durch die Verluste vermindert werden, die im Zuge der Baustofffassung und Aufbereitung der Baustoffe auftreten können. Als Erfassungsverlust wird in der Grundvariante 20% angenommen, die insbesondere aufgrund von Kontaminationssituationen, qualitativen und technisch bedingten Einschränkungen nicht für eine Aufbereitung als Betonzuschlag verfügbar sind. Die Ausschleusung feinkörniger Anteile, die außerhalb der Korngrößenanforderungen liegen, die an RC-Gesteinskörnungen zur Betonherstellung gestellt werden, wird mit 40% angenommen, bezogen auf die erfasste und an die Aufbereitungsanlage angelieferte Menge.

Unter diesen Annahmen errechnet sich das potenzielle Angebot an Recyclinggesteinskörnungen aus dem Stoffstrom abgehender recyclingrelevanter Baustoffe, multipliziert mit dem Faktor 0,48⁶⁰. Abbildung 6-7 stellt diesen Zusammenhang am Beispiel der in Gesamtdeutschland entsprechend auftretenden Stoffströme dar. Abbildung 6-8 zeigt die Mengenverhältnisse, die sich auf regionalisierter Ebene (hier in der Unterscheidung nach West- und Ostdeutschland) mittel- und langfristig hieraus ergeben.

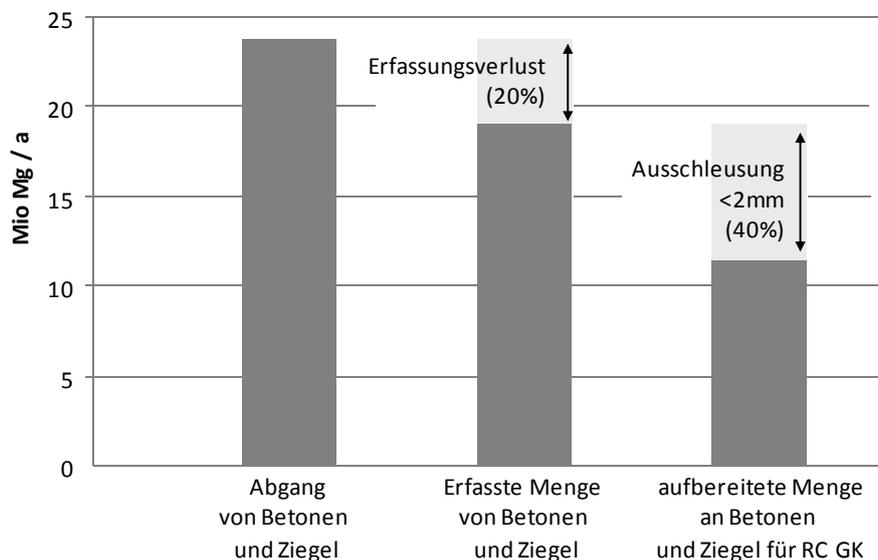


Abbildung 6-7: Baustoffabgang, erfasste Menge und aufbereitete Menge an RC-Gesteinskörnungen in Deutschland 2020

⁶⁰ 80 % erfasste Menge, davon 60 % aufbereitete RC-Gesteinskörnungen > 2mm

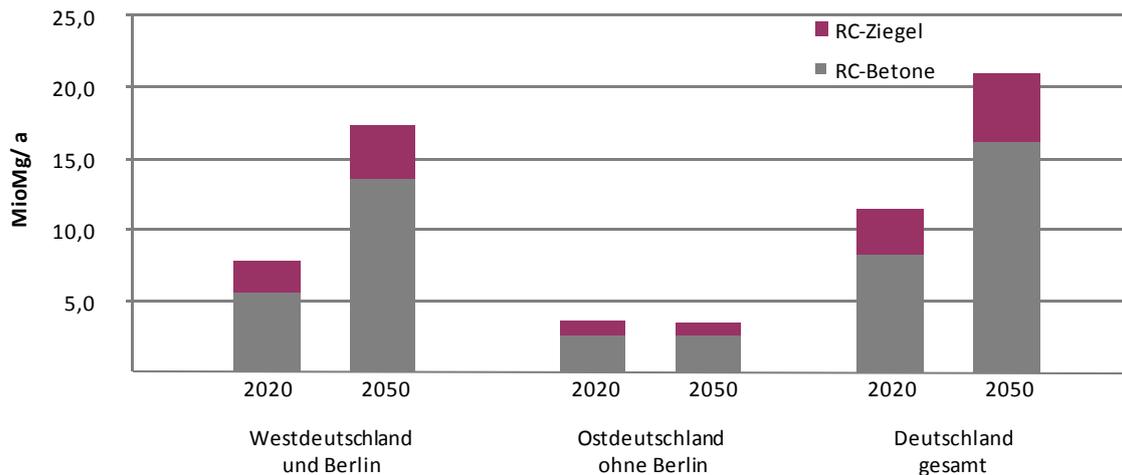


Abbildung 6-8: Potenzielles Angebot an RC-GK (aufbereitete Menge an RC-GK) nach Erfassung und Aufbereitung

Die Ausprägungen des potenziellen Angebotes an RC-GK auf der Ebene der Raumtypen sind nachfolgender Tabelle 6-1 zu entnehmen.

Tabelle 6-1: Potenzielles Angebot an Recyclinggesteinskörnungen im Jahr 2020 nach Raumtypen

	Potenzielles RC-Angebot (1000 Mg/a)								
	D	AL ges.	AL nach Raumtypen			NL ges.	NL nach Raumtypen		
			1	2	3		4	5	6
RC-Betone	7.585	5.087	1.520	813	2.754	2.498	1.753	529	216
RC-Ziegel	2.807	1.849	588	334	927	958	203	682	73
RC-GK ges.	10.392	6.936	2.108	1.147	3.681	3.456	731	2.435	290

Die Verhältnisse der berechneten Massen des Angebotes an Recyclinggesteinskörnungen zwischen den unterschiedenen Raumeinheiten entsprechen denen, die sich in den Mengenverhältnissen des Abgangs recyclingrelevanter Baustoffe (Abschnitt 6.1) darstellen, da die hier getroffenen Annahmen zu den Erfassungsverlusten und der Ausschleusung der Feinkornanteile keiner Regionalisierung unterliegen. Die absoluten Werte der RC-GK liegen entsprechend bei 48 % derer des Abgangs.

6.2.2 Substitutionspotenzial

Das Substitutionspotenzial drückt aus, wie viel Rezyklatmaterial durch Zubau in den Gebäudebestand im Rahmen technisch zulässiger Größenordnungen vom Betonbau aufgenommen werden kann. Es kann somit als potenzielle RC Nutzmenge interpretiert werden. Diese errechnet sich im Stoffstrommodell aus der Menge der in den Bestand zugehenden Betone bzw. der hierbei für die Erzeugung benötigten Gesteinskörnungen und dem zulässigen Beimischungsanteil von RC-Gesteinskörnungen. Der Gesteinskörnungsanteil im Beton wird in den Modellrechnungen mit 72 Vol.-% angenommen (s. Abschnitt 5.2), der zulässige Beimischungsanteil von RC-Gesteinskörnungen ist abhängig vom anzusetzenden Liefertyp (zum Begriff „Liefertyp“ siehe Ausführungen unter Abschnitt 5.2). In den Modellbetrachtungen werden drei Liefertypen unterschieden:

- **Liefertyp L*** entspricht der derzeit üblichen Beimischungspraxis von RC-Gesteinskörnungen die weitestgehend auf Rezyklaten aus reinem Betonbruch beruht.
- Für die **Liefertypen L1 und L2** sind zulässige Substitutionsmengen in gültigen bautechnischen Regelungen festgelegt. Zudem besteht eine Normung die für den Liefertyp L1 ein Verhältnis Betonrezyklat zu Ziegelrezyklat in der Gesteinsmischung von $\geq 90 : 10$ und für den Liefertyp 2 ein solches Verhältnis von $\geq 70 : 30$ vorschreibt, (s. hierzu Ausführungen in Kapitel 4 und in Abschnitt 5.2).

Bei Liefertyp L1 beträgt die maximal zulässige Beimischung von RC-Gesteinskörnungen 45 Vol.-% am Gesamtzuschlagsanteil, bei Liefertyp L2 reduziert sich dieser Anteil auf 35 %. Bei dem hier als L* bezeichneten, zu 100% aus Betonrezyklat bestehenden und damit qualitativ hochwertigsten Liefertyp kann dementsprechend mindestens dieselbe Substitutionsgrenze wie für den Typ L1, also 45 Vol.-% zum Ansatz gebracht werden. Demzufolge errechnet sich die potenzielle Nutzmenge an RC-Gesteinskörnungen mit dem Faktor 0,324⁶¹, multipliziert mit der potenziellen Nutzmenge an Betonen für die Liefertypen L* und L1. Für Liefertyp L2 beträgt dieser Faktor 0,252⁶². Das substituierbare Volumen natürlicher Gesteinskörnungen im Beton durch RC-Gesteinskörnungen liegt demnach bei den Liefertypen L* und L1 bei knapp ein Drittel des Volumens an potenzieller Beton-Nutzmenge bzw. entsprechend bei rund einem Viertel im Falle von Liefertyp L2. In den linken volumenbezogenen Säulen der Abbildung 6-9 werden diese Verhältnisse am Beispiel der angesprochenen Stoffflüsse, bezogen auf das Jahr 2020 und Deutschland, insgesamt deutlich. Die rechte Hälfte der Abbildung in Gewichtseinheit Mio. Mg untersetzt die Volumenbetrachtung durch die Differenzierung in Beton-RC und Ziegel-RC.

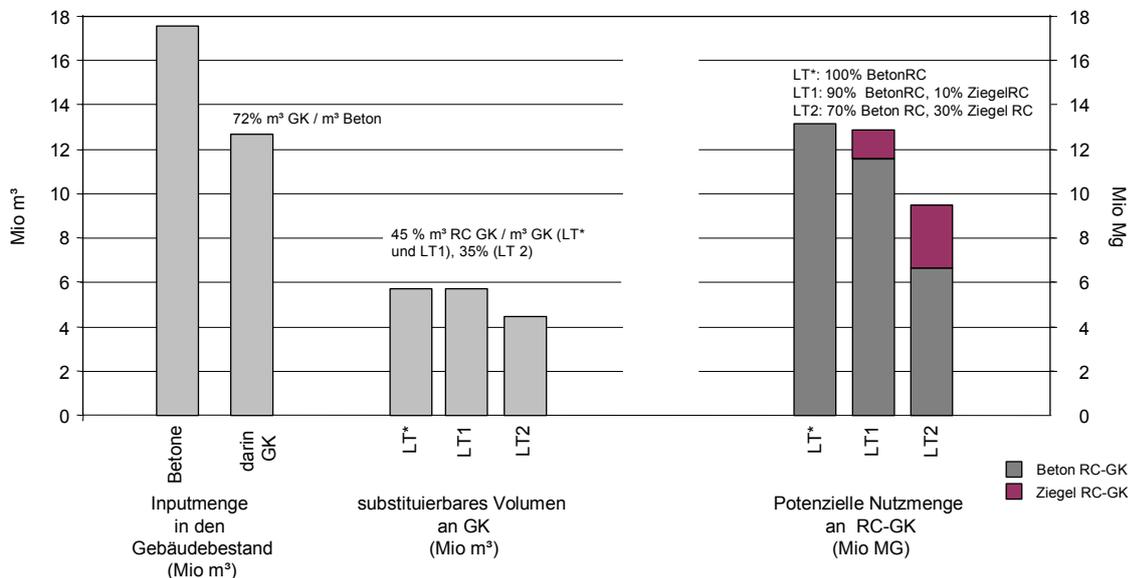


Abbildung 6-9: Potenzielle Nutzungen an Betonen, Gesteinskörnungen und daraus abgeleitete Menge an einsetzbaren RC-GK für unterschiedliche Liefertypen am Beispiel von Deutschland 2020 (in Jahreswerten)

⁶¹ 0,72 Anteile Gesteinskörnungen am Beton * 0,45 zulässige Beimischungsmenge

⁶² 0,72 Anteile Gesteinskörnungen am Beton * 0,35 zulässige Beimischungsmenge

Unter Beachtung der aufgeführten, liefertypenabhängigen Mengenverhältnisse an Beton- und Ziegelrezyklat im zulässigen RC-Gesteinskörnungsanteil sowie von Annahmen zur jeweiligen Materialdichte (s. Abschnitt 5.2) kann das „substituierbare Volumen“ in Tonnagen an potenziell nutzbarem Beton- und Ziegelrezyklat ausgedrückt werden. In der Darstellung der „potenziellen Nutzmenge“, rechts in Abbildung 6-9, ist dies bezogen auf Deutschland gesamt im Jahr 2020 dargestellt. Hier wird deutlich, dass die potenziell nutzbaren Massen von Liefertyp L* über L1 bis hin zu L2 abnehmen. Beim Übergang von L* zu L1 sind hierfür abweichende Rohdichten zwischen Beton- und Ziegelrezyklat die Ursache. Ziegelrezyklat weist eine geringere Dichte als Betonrezyklat auf. Beim Übergang von L* bzw. L1 zu L2 ist der Rückgang der nutzbaren Masse an Rezyklatstoff neben den genannten Dichteunterschieden auch auf den geringeren zulässigen Substitutionsanteil gegenüber L* bzw. L1 zurückzuführen. Gleichzeitig steigt der Anteil an Ziegelrezyklat an der substituierbaren Masse von L* über L1 nach L2 absolut und relativ an. Die Effekte der Wahl des Liefertyps auf die nutzbare Mengen rezyklierter Gesteinskörnung sind bezogen auf die betrachteten RC-Fractionen Beton und Ziegel damit gegenläufig. Hier deutet sich bereits ein Gestaltungsspielraum der Beeinflussung des erreichbaren Ressourcenschonungspotenzials an. Je nach Mengen zur Verfügung stehender RC-Materialien der genannten Stofffraktionen und deren Verhältnis zueinander kann die Wahl des Liefertyps die Höhe der mit der verfügbaren Menge an RC-Material erreichbaren Substitution von Gesteinskörnungen im nachgefragten Beton unterschiedlich beeinflussen. Hieraus können sich Optimierungspotenziale ergeben (s. hierzu nachfolgende Ausführungen).

6.3 Ableitung des Ressourcenschonungspotenzials

Ergebnisse der in den vorangegangenen Abschnitten errechneten Modellierungsschritte sind Aussagen zum Potenzial an Angebot (Bereitstellungspotenzial) und Nutzmenge (Substitutionspotenzial) an RC-Gesteinskörnungen, das sich unter den getroffenen Annahmen zur Gebäudebestandsentwicklung sowie den technisch zulässigen Größenordnungen ergibt. Diese beiden Größen werden nachfolgend saldiert, um hieraus Aussagen zum erreichbaren Ressourcenschonungspotenzial (RESPOT) treffen zu können.

Unter Ressourcenschonungspotenzial (RESPOT) wird das Abbauvolumen verstanden, das durch die Substitution von Naturkiesmaterial in Betonen durch Rezyklat vermieden wird. Im Rechenmodell wird das vermeidbare Abbauvolumen gleich dem Volumen des substituierten Naturkiesmaterials angenommen (s. Kapitel 4).

Als Messlatte zur Einordnung und Bewertung des erreichbaren RESPOT wird dieses dem maximal erreichbaren Substitutionspotenzial gegenübergestellt. Letzteres entspricht dem durch Einsatz von RC-Material maximal erreichbaren Substitutionsvolumen natürlicher Gesteinskörnungen unter Beachtung technisch zulässiger Größenordnungen, ohne Berücksichtigung von RC-Angebotsbeschränkungen. Bei gegebener Betonnachfrage wird das maximal erreichbare Substitutionsvolumen unter Annahme von Liefertyp L* bzw. Liefertyp L1 erreicht, bei denen der maximale Substitutionsanteil von 45 Vol.-%, bezogen auf die Gesamtmenge an Gesteinskörnungen im Beton, erreicht werden kann. Der Wert des RESPOT kann gleich oder kleiner des Wertes des maximal erreichbaren Substitutionspotenzials sein. Ist das Angebot an RC-Gesteinskörnungen ausreichend, um die maximale potenzielle Nutzmenge

an RC-GK zu decken, erreicht das RESPOT den Wert des maximal erreichbaren Substitutionspotenzials. Reicht das RC-Angebot nicht zur Deckung der RC-Nutzmenge aus, liegt das erreichbare RESPOT unter dem maximal erreichbaren Substitutionspotenzial.

RESPOT ist als volumenbasierte Größe definiert. Entsprechend erfolgen auch die Darstellungen zum RESPOT sowie zum maximal erreichbaren Substitutionspotenzial volumenbasiert.

6.3.1 Erreichbares RESPOT im Jahr 2020 unter Annahme heute üblicher Liefertypen (L*)

Wird in der Praxis hochwertiges Recycling angewendet, erfolgt dies derzeit unter Ansatz von Liefertyp L*. Hiervon wird in der Grundvariante der Berechnung des erreichbaren RESPOT zunächst ausgegangen.

Unter Annahme des Liefertyps L* beschränkt sich die Zulässigkeit beizumengender RC-GK auf Beton RC-GK. Demzufolge umfasst das zu berücksichtigende potenzielle RC-Angebot nur die Betonbestandteile. Die Ziegelfraktion bleibt unberücksichtigt. In Abbildung 6-10 ist das relevante RC-Angebot unter Annahme von L* der potenziellen Nutzmenge an RC-GK gegenübergestellt. Deutlich zeigt sich auch hier das Übergewicht der potenziellen Nutzmenge gegenüber dem potenziellen Angebot an RC-GK in den Raumtypen Westdeutschlands. Hier ist das Angebot an RC-GK deutlich zu gering, um das vorhandene maximale Substitutionspotenzial auszuschöpfen. Dagegen reicht das RC-GK in den Raumtypen 4 und 5 in Ostdeutschland deutlich aus, um die potenzielle Nachfrage zu befriedigen. Es besteht eine Situation des Überangebotes an RC-GK.

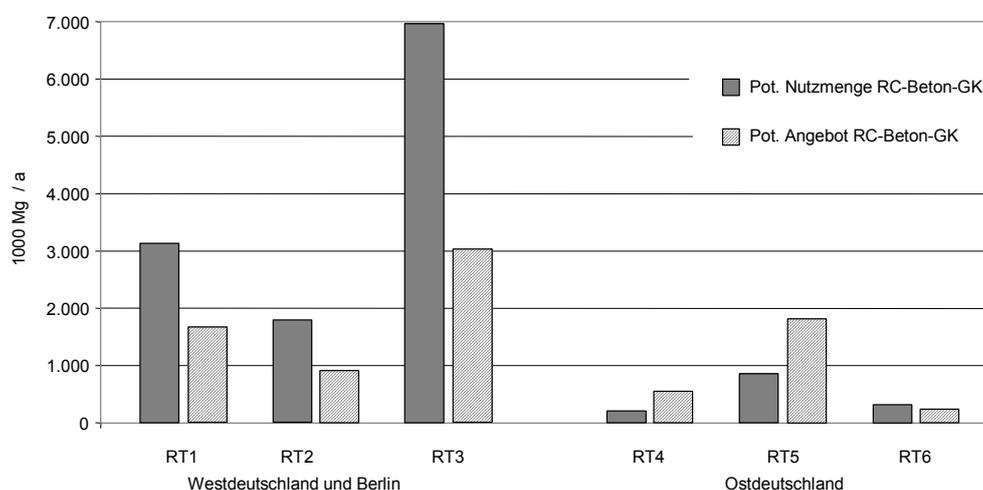


Abbildung 6-10: Potenzielle Nutzmenge an RC-GK und relevantes RC-Angebot unter Annahme von L* für das Jahr 2020

Bei Bilanzierung von der in Abbildung 6-10 aufgeführten potenziellen Nutzmenge an RC-GK mit dem vorhandenen relevanten RC-Angebot errechnet sich das in Abbildung 6-11 dargestellte RESPOT in den Raumtypen. Dieses ist in der Abbildung mit dem maximalen Substitutionspotenzial hinterlegt. Absolut werden die höchsten RESPOTs in den Raumtypen Westdeutschlands erreicht, und hier insbesondere in Raumtyp 1. Dies ist dadurch bedingt, dass

hier insgesamt deutlich größere Bestände anliegen als in den nach Flächen und Bevölkerung schwächer besetzten Raumtypen Ostdeutschlands. Durch die Hinterlegung des RESPOTs mit dem maximalen Substitutionspotenzial wird aber deutlich, dass in den genannten Raumtypen Westdeutschlands das RESPOT deutlich hinter dem maximalen technischen Substitutionspotenzial zurückliegt. In den Raumtypen 4 und 5, wo hoher Angebotsüberhang an RC-Material zu beobachten war, erreicht das RESPOT die maximal mögliche Ausprägung und ist damit gleich dem Betrag des maximalen technischen Substitutionspotenzials. In Raumtyp 6 bleibt das berechnete RESPOT hinter dem maximalen technischen Substitutionspotenzial zurück, verglichen mit den absoluten Differenzen, die in den westdeutschen Raumtypen zu beobachten sind, fällt der „Fehlbetrag“ allerdings vergleichsweise gering aus.

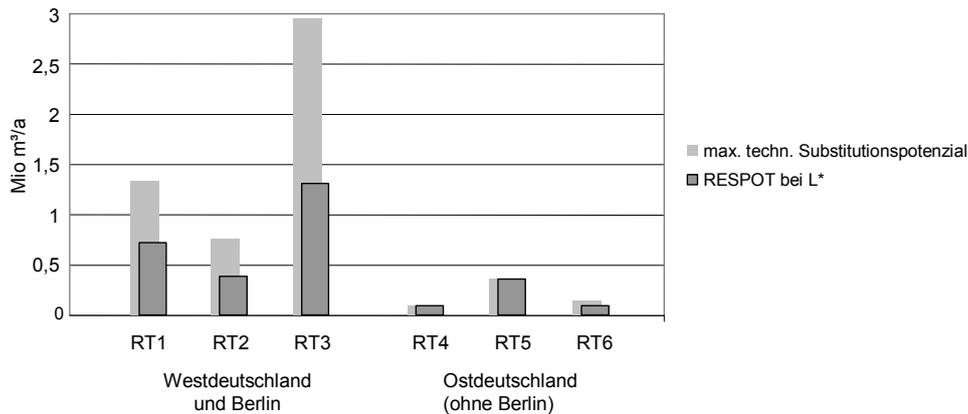


Abbildung 6-11: RESPOT unter Annahme von Liefertyp L* (100 % Betonanteil im RC-Granulat) für das Jahr 2020 vor dem Hintergrund des max. technischen Substitutionspotenzials

Abbildung 6-12 stellt denselben Zusammenhang als indizierte Darstellung dar. Dabei ist das maximale Substitutionspotenzial in den Raumtypen jeweils auf 100 % gesetzt.

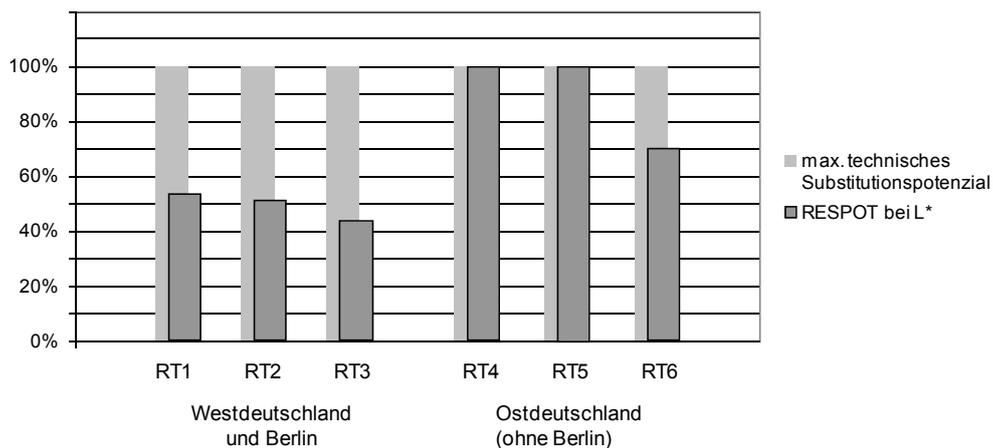


Abbildung 6-12: RESPOT unter Annahme von Liefertyp L* (100 % Betonanteil im RC-Granulat) für das Jahr 2020 vor dem Hintergrund des max. technischen Substitutionspotenzials (indizierte Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %)

Hier tritt die starke Unterschreitung des maximalen Substitutionspotenzials durch das erreichbare RESPOT noch klarer hervor. So liegt dieses in Raumtyp 3 deutlich unter 50 % des maximalen Substitutionspotenzials, in Raumtyp 2 wird die Marke von 50 % knapp erreicht, in Raumtyp 1 knapp überschritten. In Raumtyp 6 zeigt sich in abgeschwächter Form die Mangelsituation, die auch in den Raumtypen Westdeutschlands zu beobachten ist.

Die sich dabei abzeichnend Überschuss- und Mangelsituation wird aus der Darstellung in Abbildung 6-13 deutlich. Die Ausprägungen des Mangels an RC-GK in Abbildung 6-13 entsprechen der Differenz aus dem in den Raumtypen jeweils vorhandenen maximalen Substitutionspotenzial und dem erreichbaren RESPOT aus Abbildung 6-12. Deutlich wird in dieser Zusammenstellung, dass insbesondere in den Raumtypen Westdeutschlands, abgeschwächt in RT 6 in Ostdeutschland, eine Gleichzeitigkeit von Überschuss und Mangel vorherrschen. Allerdings bezieht sich der Überschuss auf unter L* Annahme nicht nutzbare Ziegel RC-GK. Dies trifft aber bei Annahme der Liefertypen L1 und noch mehr bei Liefertyp L2 so nicht mehr zu. Das RESPOT kann demnach gesteigert werden, wenn in den betroffenen Raumtypen ein angepasster Liefertyp gewählt wird. Dadurch kann sich allerdings das Volumen der potenziellen RC-GK-Nutzmenge insgesamt verringern. In jedem Fall verringert sich aufgrund des Dichteeffektes die Masse der potenziellen RC-GK-Nutzmenge (s. auch Abbildung 6-9).

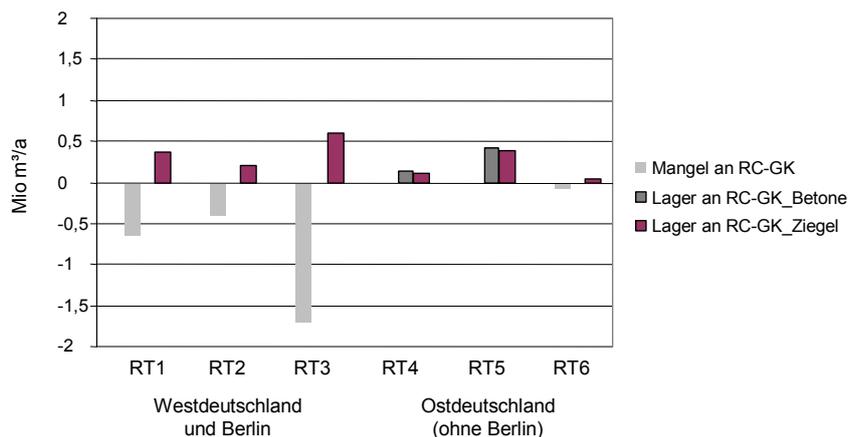


Abbildung 6-13: Regionalisierte RC-GK Mangel und Überschussprofile im Jahr 2020 unter der Annahme von L*

6.3.2 Erreichbares RESPOT im Jahr 2020 bei regionsspezifischer Optimierung des Liefertyps

Um das erreichbare RESPOT durch zusätzliche Nutzung vorhandener Ziegel RC-GK-Lager in Raumtypen mit ausgeprägtem Mangel an Beton-RC-GK zu steigern, wird eine Optimierung des Liefertyps in den Raumtypen vorgenommen. Die Optimierung zielt auf eine Maximierung des erreichbaren RESPOT ab.

Für die Raumtypen 1, 2, 3 und 6 erweist sich der Liefertyp L2 als optimal hinsichtlich der Maximierungsanforderung des RESPOT. In RT 4 und 5, in denen bereits bei L* 100 % des maximalen Substitutionspotenzials erreicht werden, ist keine Anpassung des Liefertyps erforderlich. Abbildung 6-14 zeigt die Gegenüberstellung der Größen der potenziellen Nutz-

menge an RC-GK und des relevanten RC-Angebotes nach Liefertyp-Optimierung. Hier werden die beiden gegenläufigen Effekte deutlich: Das potenzielle relevante RC-Angebot steigt in den Raumtypen, bei denen Liefertyp L2 unterstellt wird um den Anteil der Ziegel RC-GK an. Gleichzeitig sinkt die potenzielle Nutzmenge an RC-GK (hier in der massenbezogenen Darstellung) aufgrund der geringeren zulässigen Beimischungsmenge und aufgrund des Dichteeffektes (geringere Dichte von Ziegel-RC-GK gegenüber Beton-RC-GK). Angebot und potenzielle Nutzmenge an RC-GK liegen jetzt in den Raumtypen 1, 2 und 6 in ähnlichen Größenordnungen. In Raumtyp 3 bleibt die Mangelsituation weiter bestehen, allerdings deutlich abgeschwächt als unter Annahme von L*

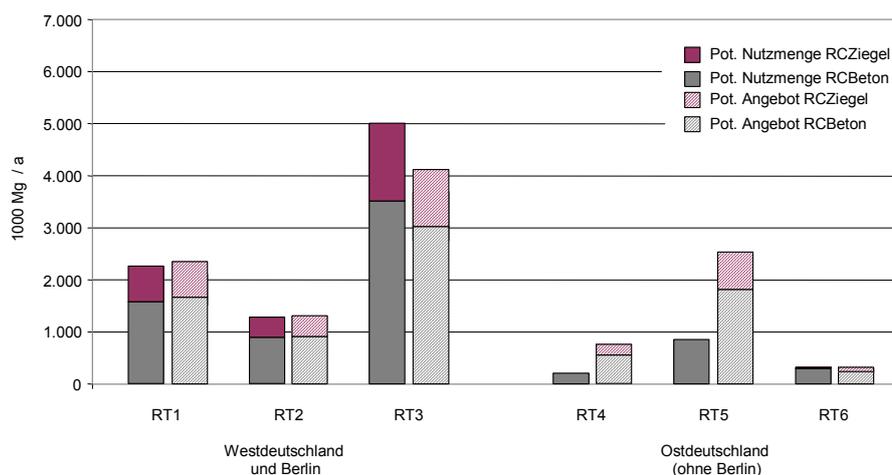


Abbildung 6-14: Potenzielle Nutzmenge an RC-GK und relevantes RC-Angebot bei optimiertem Liefertyp für 2020

Die Veränderungen Erreichungsgrades des maximalen Substitutionspotenzials durch das RESPOT, das unter Annahme optimierter Liefertypen in den Raumtypen berechnet ist, wird aus Abbildung 6-15 sichtbar. Die berechneten RESPOTs steigen in den Raumtypen 1, 2 und 6 auf ca. 80 % des maximalen Substitutionspotenzials an. In RT 3 liegt das erreichbare RESPOT jetzt bei nahezu 60 % des maximalen Substitutionspotenzials.

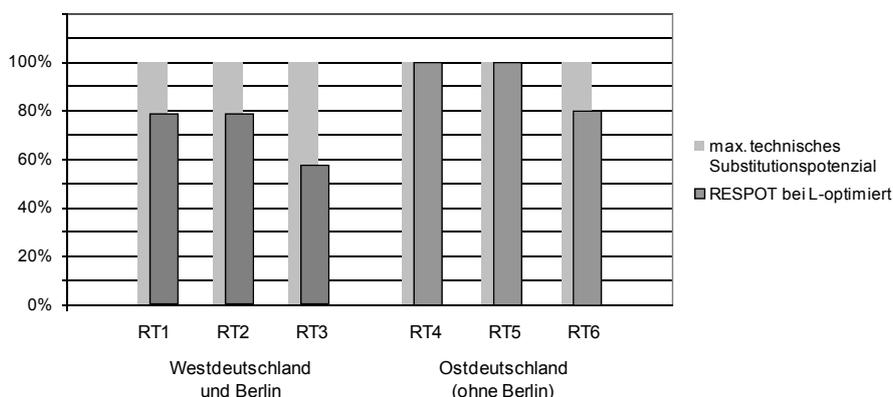


Abbildung 6-15: RESPOT bei optimiertem Liefertyp (L2 in RT1, RT2, RT3 und RT6 und L* in RT4 und RT5) für das Jahr 2020 (indiziert Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %)

6.3.3 Erreichbares RESPOT im Jahr 2020 bei regionsspezifischer Optimierung des Liefertyps und zusätzlicher Optimierung der Erfassungsquote

Weitere Optimierungsoptionen des RESPOT können diskutiert werden, wenn die getroffenen Annahmen zu Erfassung und Aufbereitung tiefergehend hinterfragt werden. Zusätzliche Optimierungspotenziale könnten insbesondere im Bereich der Erfassung liegen. Bei Ausreizung der Möglichkeiten ist eine Steigerung der Erfassungsquote auf theoretische 90% denkbar. Unter Annahme dieser höheren Quote ist das in Abbildung 6-16 abgebildete (indizierte) RESPOT berechnet.

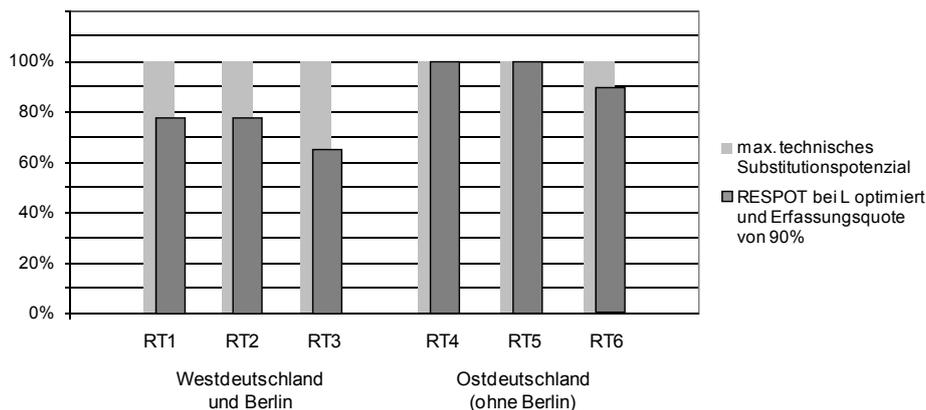


Abbildung 6-16: RESPOT bei optimiertem Liefertyp (L2 in RT1, RT2, RT3 und RT6 und L* in RT4 und RT5) und Erhöhung der Erfassungsquote von 80 % auf 90 % für das Jahr 2020 (indizierte Darstellung – Index max. technisches Substitutionspotenzial = 100 %)

Die resultierenden RESPOT lassen sich mit dieser Anpassung weiter steigern, auf nahezu 80 % des maximalen Substitutionspotenzials in den Raumtypen 1 und 2, auf 90 % in Raumtyp 6, und nun deutlich über 60 % im Raumtyp 3. Die nachfolgenden kartografischen Darstellungen stellen die Wirkungen der vorgenommenen Optimierungskaskade in ihrer räumlichen Ausprägung dar.

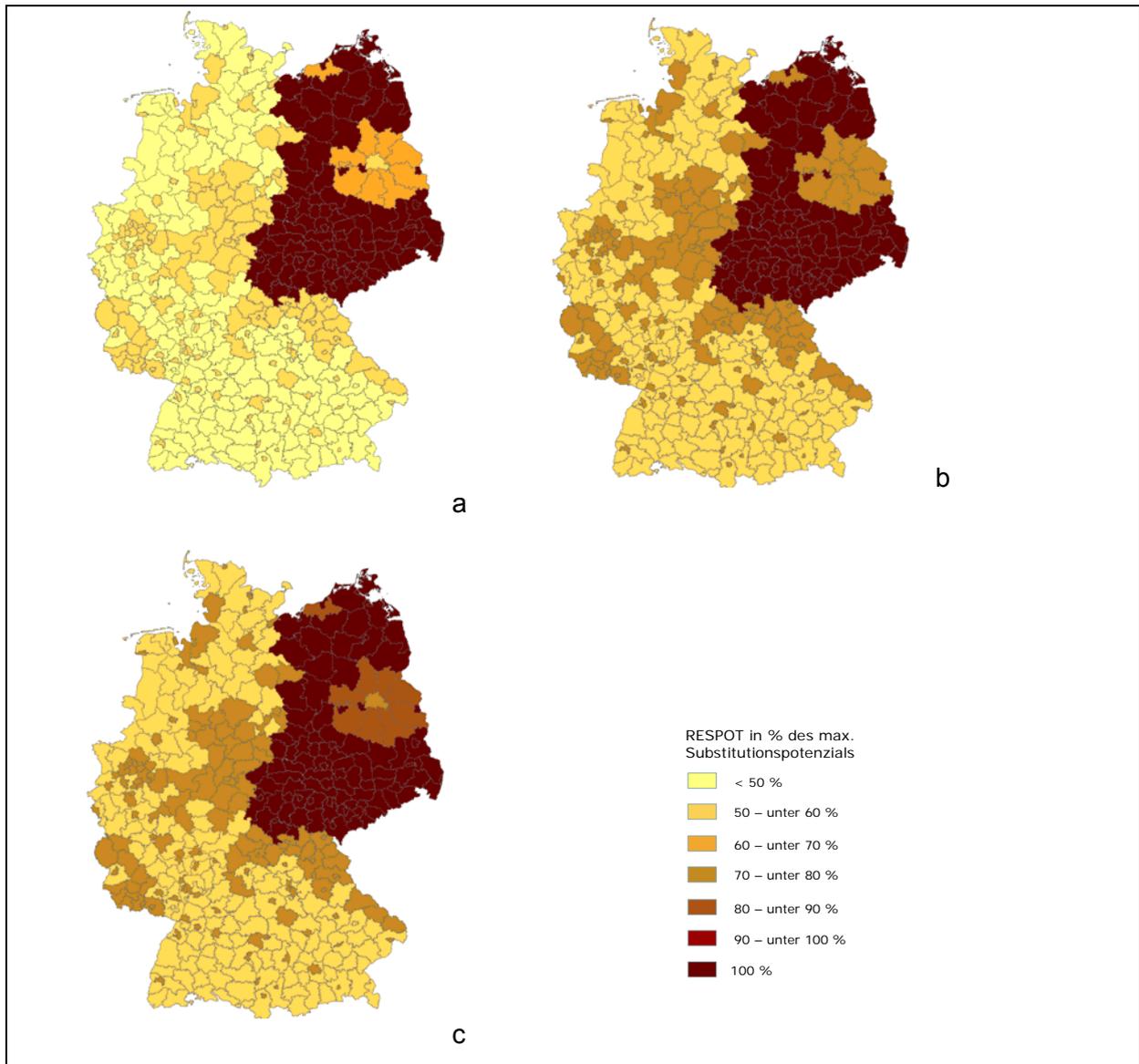


Abbildung 6-17: Anteil des maximalen Substitutionspotenzials mit dem erreichbaren RESPOT im Jahr 2020 unter Annahmen von L^* (a), L_{opt} (b), jeweils bei 80 % Erfassungsquote sowie L_{opt} bei 90 % Erfassungsquote (c)

6.3.4 Einfluss veränderter Annahmen zum Baugeschehen auf das erreichbare RESPOT (Sensitivitätsanalyse 2020)

In Abschnitt 5.1 sind die Annahmen zur Bautätigkeit aufgeführt, die den hier dargestellten Berechnungen zugrunde liegen. Weiter werden dort zwei Varianten genannt, deren Wirkung auf das erreichbare RESPOT im Folgenden geprüft werden können. Anliegen dieser Prüfung ist es, die Robustheit der Aussagen zu prüfen. Wie bedeutsam sind andere Zugangsannahmen bzw. Abgangsannahmen? Diese Prüfung dient vor allem der Einschätzung, wie wirkungsvoll diese Größen auf die mittelfristige Perspektive 2020 sind.

In Variante 1 erfolgt eine Modifizierung der Annahmen zum Zugang an Wohngebäuden⁶³. Anstatt der Referenzannahmen wird der Zugang in Anlehnung an das in der Raumordnungsprognose (BBR 2006) angegebene Neubaupotenzial angenommen. Diese angenommenen Zugangszahlen liegen über den Zugangszahlen der Basisvariante. Die Abweichungen sind insgesamt gesehen jedoch moderat (s. Ausführungen in Abschnitt 5.2).

In Variante 2 werden die Annahmen zum Abrissgeschehen modifiziert und anstatt der Referenzannahmen Abgangsquoten eingesetzt, wie sie sich in den vergangenen Jahren in der Bautätigkeitsstatistik widerspiegelt haben. Die hieraus ermittelten Abgangszahlen unterschreiten die Abgangszahlen der Basisvariante. In den Raumtypen Ostdeutschlands fällt diese Unterschreitung moderat aus. In den Raumtypen Westdeutschlands ist die Abweichung deutlich stärker (s. Abschnitt 5.1). Abbildung 6-18 fasst das Ergebnis dieser Betrachtung als Übersicht zusammen.

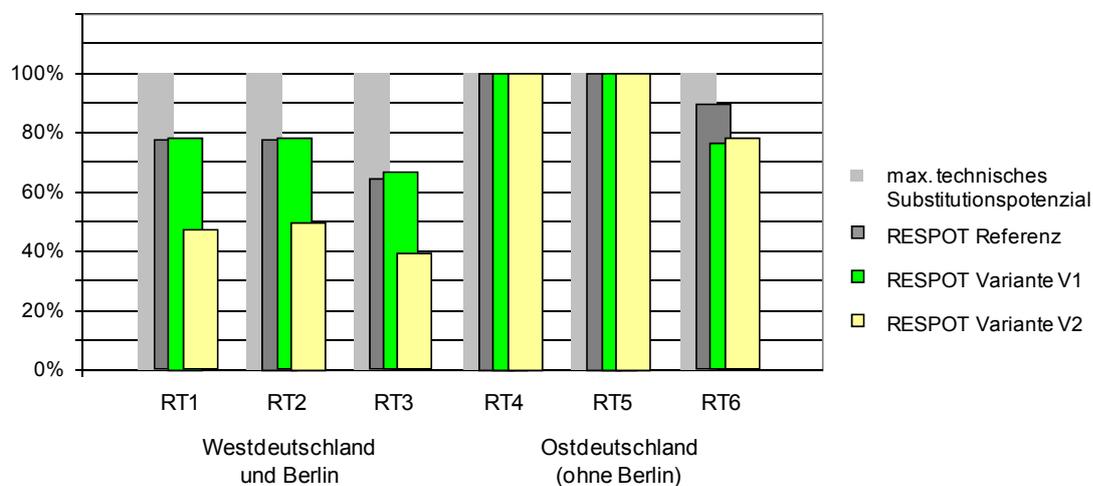


Abbildung 6-18: Auswirkungen veränderter Annahmen zum Baugeschehen auf das RESPOT (indizierte Darstellung)

Die Auswirkungen der veränderten Annahmen zum Baugeschehen wirken sich in den Raumtypen in Ostdeutschland nur marginal aus. In den Raumtypen 2 und 4 wird in allen Varianten das maximale Substitutionspotenzial ausgeschöpft. In Raumtyp 6 kommt es lediglich zu moderaten Verschiebungen. In den Raumtypen Westdeutschlands gilt dies auch für den Fall der Variante 1. Hier werden ähnliche Größenordnungen des RESPOTs erreicht. Deutlich sensibler reagiert hier das RESPOT unter Annahme von V2, hier kommt es nahezu zu einer Halbierung der Werte gegenüber der Basisvariante. Die Grundaussagen bleiben jedoch von den Veränderungen unberührt. In den Raumtypen Westdeutschlands wird mittelfristig ein Mangel an RC-GK vorherrschen, unklar ist lediglich, wie stark dieser Mangel ausgeprägt sein wird. In Ostdeutschland verändert grundsätzlich nichts an der Aussage, die unter Basisannahmen getroffen werden können. Hier können ausreichend RC-GK aus abgehenden Bauabfallströmen gewonnen werden, um das maximale Substitutionspotenzial zu erreichen. Eine Ausnahme bildet der RT 6, der in keiner der Varianten das maximale Substitutionspotenzial erreicht. D. h. also, im Ergebnis der Sensitivitätsprüfung können alle Grundaussagen über

⁶³ Der Zugang an Gewerbegebäuden wird konstant gehalten.

die Varianten hin als bestätigt gelten. Lediglich in Westdeutschland ist es eine Frage, ob der Mangel an RC-GK groß oder weniger groß ist.

6.3.5 RESPOT in mittel- und langfristiger Perspektive

Nachfolgende Abbildung zeigt das erreichbare RESPOT im Vergleich der mittel- und langfristigen Perspektiven, bezogen auf die Jahre 2020 und 2050 in einer Regionalisierung nach Ost/West in der Basisvariante ohne Sensitivitätsprüfung. Eine Sensitivitätsprüfung wäre hier mit zu großen Unsicherheiten verbunden und würde ohnehin nur auf die Frage hinauslaufen, ob das Substitutionspotenzial in Westdeutschland geringfügig kleiner ausfällt.

In der Darstellung für 2020 spiegeln sich die bereits oben auf Ebene der Raumtypen dargestellten Verhältnisse wider. Hiervon unterscheidet sich die Situation in 2050. Sowohl in Ost als auch in West reduziert sich die erreichbare Substitution aufgrund eines Rückgangs des Baugeschehens deutlich. Der gleichzeitige Anstieg der Abrisstätigkeit (s. Abschnitt 5.1) hat zur Konsequenz, dass nun auch in Westdeutschland das vorhandene vom Zugang induzierte dann noch mögliche Substitutionspotenzial bereits unter Annahme von L^* zu 100 % ausgeschöpft werden kann.

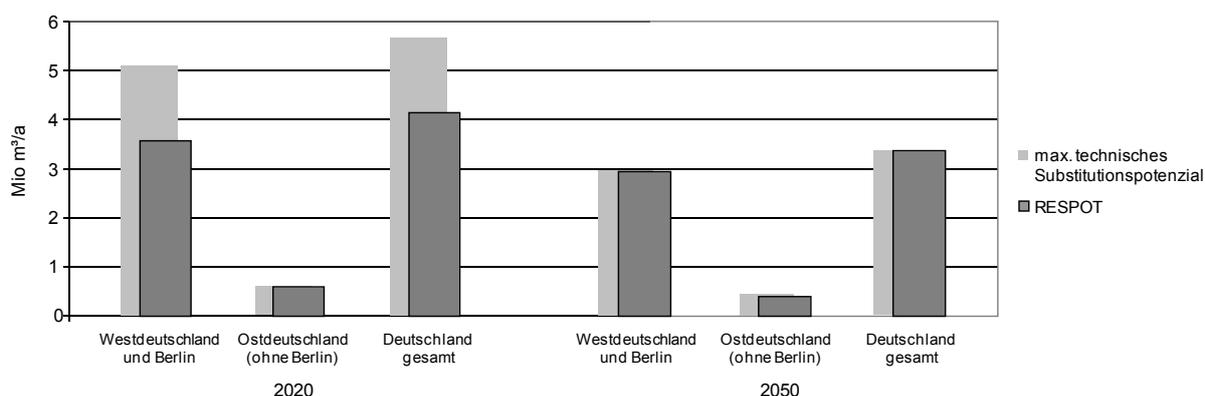


Abbildung 6-19: RESPOT vor dem Hintergrund des max. theoretischen Substitutionspotenzials unter Annahme von L_{opt} bei 90 % Erfassungsquote im Jahr 2020 in der Unterscheidung Ost/West

7 Interpretation und Empfehlungen

7.1 Ergebniszusammenfassung und -interpretation

Die Ergebnisse der Studie zeigen die erreichbaren Mengen an Primärrohstoffen auf, die durch hochwertiges Recycling mineralischer Bauabfallstoffe in Betonanwendungen des Hochbaus substituiert werden können. Mittelfristig, bezogen auf das Jahr 2020, kann das in Deutschland hierdurch zu erzielende Ressourcenschonungspotenzial auf 4,1 Mio. m³/Jahr beziffert werden. Dies entspricht einer Masse von 10,9 Mg/Jahr⁶⁴.

Dem gegenüber verbleibt zusätzlich eine potenzielle Menge von 1,8 Mio. m³ hochwertig aufbereiteten RC-Materials (ca. 3,8 Mio. t)⁶⁵, für die sich aufgrund einer im Verhältnis zum Abbruchgeschehen niedrigen Nachfragesituation aus laufender Neubautätigkeit innerhalb regional begrenzter Recyclingmärkte kein Absatz als Betonzuschlagstoff im Hochbau darstellen lässt. Diese „Überschüsse“ entstehen vor allem in ostdeutschen Regionen, wo bereits heute aufgrund strukturell anhaltender Bevölkerungsrückgänge insbesondere im Wohnbau-bereich mit schrumpfenden Gebäudebeständen zu rechnen ist.

Gleichzeitig zeigen sich Konstellationen der Gebäudebestandsentwicklung, bei denen nach Maßgabe heutiger Möglichkeiten der Bauabfallgewinnung und -aufbereitung die aus Abbruchmaterial des Hochbaus gewinnbare Menge hochwertiger Gesteinskörnungen nicht ausreicht, das maximale technische Substitutionspotenzial auszuschöpfen. Hierbei handelt es sich um Regionen, in denen die Neubaudynamik die Abrissintensität deutlich⁶⁶ übersteigt. Der dadurch entstehende „Mangel“ regional verfügbarer Recycling-Gesteinskörnungen wurde für das Jahr 2020 mit 1,6 Mio. m³ berechnet und liegt damit nahezu in der Größenordnung des in Schrumpfungsregionen entstehenden Rezyklatüberschusses (s. o.).

Bei einer reinen Fokussierung auf den Einsatz der aus mineralischem Hochbauabfall gewinnbaren RC-Gesteinskörnungen als Betonzuschlag im Hochbau bilden sich mittelfristig in Deutschland inkongruente Tendenzen aus: Es bilden sich für hochwertiges RC-Material Regionen mit Überschussmengen und gleichzeitig Regionen mit Mangel aus.

Diese regionalen Disparitäten sind insbesondere auf unterschiedliche demografische Entwicklungsabläufe zurückzuführen. Sie können aufgrund der nur in engen räumlichen Grenzen wirtschaftlich realisierbaren Baustoffrecyclingkreisläufe nicht aufgelöst werden, sondern verlangen nach einer regionalisierten Herangehensweise, wie sie dieser Studie zugrunde liegt. Nur so ist es sinnvoll möglich, Potenziale zur Kreislaufführung im Hochbau adäquat zu erfassen und auszuschöpfen.

Die Einschätzung und Ausschöpfung des Ressourcenschonungspotenzials durch hochwertiges Recycling erfordert einen regionalisierten Ansatz.

⁶⁴ bei angenommener Rohdichte von Kies in Höhe von 2,65 kg/dm³

⁶⁵ Die 1,8 Mio m³ setzen sich zusammen aus 1,1 Mio m³ Beton RC-GK und 0,69 Mio m³ Ziegel RC-GK. Für Beton RC-GK wird eine Rohdichte von 2,32 kg/dm³ abgenommen, für Ziegel RC-GK eine Rohdichte von 1,83 kg/dm³.

⁶⁶ Faktor 3,8 bis 4,2

Betonzuschlag aus RC-Gesteinskörnungen kann als Gemisch aus Beton- und Ziegelgranulat vorgehalten werden. Die zulässigen Anteile der verschiedenen Stoffgruppen regelt die DIN 4226-100 mit der Festlegung von Liefertypen. In Abhängigkeit davon sind bestimmte Beimischungsmengen an RC-Zuschlag in den Beton bautechnisch zulässig. Mit erhöhtem Ziegelanteil im RC-Zuschlag verringert sich der maximal zulässige Beimischungsanteil an rezykliertem Gesteinsmaterial im Beton. Nach bestehenden Regelungen ist die Substitution von maximal 45 Vol.-% der Gesteinskörnungen im Beton durch RC-Granulat zulässig, beläuft sich der Anteil an Ziegelbestandteilen im Zuschlag auf über 10 bis 30 Gew.-% (Liefertyp 2), reduziert sich der technisch zulässige Ersatzanteil natürlichen Gesteinsmaterials im Beton auf 35 Vol.-%.

Demzufolge ist die höchste Substitution dann zu erreichen, wenn ausreichend Beton aus Abbruchtätigkeit vorliegt und somit ein RC-Zuschlagsgemisch eingesetzt werden kann, welches zu mindestens 90 Gew.-% aus RC-Betongranulat besteht (Liefertyp 1). Reicht das verfügbare Beton-RC-Material dagegen nicht aus, um beim nachgefragten Beton die technisch maximal erlaubte Substitution natürlicher Gesteinskörnungen vorzunehmen, kann es hinsichtlich der Maximierung der Ressourcenschonung von Vorteil sein, Gesteinskörnungsmischungen mit erhöhtem Ziegelanteil zum Einsatz zu bringen, obgleich sich die zulässige Beimischungsmenge pro Einheit Beton dadurch verringert. Vorteilhaft ist diese Anpassung dann, wenn die verfügbare Menge an RC-Granulat des Liefertyps 1 unterhalb der technisch in Betone einbringbaren Menge an RC-Granulat von Liefertyp 2 bleibt und zusätzlich noch ungenutzte Ziegelmengen der entsprechenden Qualität aus Abbruchmaterial zur Verfügung stehen. Diese Konstellationen können in den Regionstypen nachgewiesen werden, die bei Zugrundelegen gegenwärtiger Recyclingpraxis einen deutlichen Mangel an RC-GK aufweisen. Hier lässt sich das erreichbare Ressourcenschonungspotenzial rechnerisch erhöhen, indem bei den zum Einsatz vorgesehenen RC-Zuschlägen ein Wechsel hin zu den ziegelreicheren Gesteinskörnungsmischungen angenommen wird. In der Summe zeigt sich für Gesamtdeutschland im Jahr 2020 eine Steigerung des Ressourcenschonungspotenzials um 31 % gegenüber der derzeit üblicher Beimischungspraxis⁶⁷, wenn es zu einer an die regionalen Verhältnisse von RC-Angebot und -nachfrage angepassten Liefertypenverwendung käme. Dies entspricht einer jährlichen zusätzlich erzielbaren Schonung von ca. 945.000 m³ Abbauvolumen natürlicher Gesteinskörnungen. Noch weitreichendere Potenziale würden sich in Regionen mit RC-„Überschuss“ aus der durch die Bauforschung bereits als machbar erwiesenen Erhöhung der Beimischungsanteile an RC-Material (in der Größenordnung von 60 bis 90 Vol.-% Rezyklatanteil im Zuschlag) sowie der Zulässigkeit von RC-Mischgranulaten über den Liefertyp 2 hinaus ergeben.

Die für den Betonbau zulässigen Zusammensetzungen der RC-Gesteinskörnungen haben mittelfristig wesentlichen Einfluss auf das durch hochwertiges Recycling erreichbare Ressourcenschonungspotenzial. Das höhere Ressourcenschonungspotenzial bestimmter Mischungen ergibt sich aus dem Verhältnis von verfügbarer Menge an RC-Gesteinskörnungen und der aus der Nachfrage nach Beton als Zuschlag einbringbaren Menge. Dieses Verhältnis differiert mittelfristig regional stark.

⁶⁷ 100 % Betongranulat im einzubringenden RC-Zuschlag

Neben der Beeinflussung der Input-Seite durch Verwendung entsprechender Zusammensetzungen der RC-Gesteinskörnungen sowie durch veränderte Zulässigkeiten beim Einsatz von RC-Betonzuschlag sind Optimierungen bei der Erfassung und Aufbereitung abgehender Bauabfälle aus dem Gebäudebestand ein denkbarer Ansatzpunkt, um zu einer Steigerung des Ressourcenschonungspotenzials durch hochwertiges Recycling zu gelangen.

Den Modellbetrachtungen liegen Annahmen für die möglichst sortenreine Erfassung der als Bauabfall freiwerdenden Ziegel- und Betonmassen mit einer Erfassungsquote von 80 % zugrunde. Dies verlangt bereits hohe logistische und technische Anstrengungen im Abbruchprozess und unterstellt den flächendeckenden selektiven Rückbau von Gebäuden. Obgleich vermutlich mit erheblichen zusätzlichen Aufwendungen verbunden, ist es zumindest technisch denkbar, diese Quote weiter zu steigern. Entsprechende Modellabschätzungen zeigen aber, dass die hierdurch zusätzlich erreichbaren Ressourcenschonungspotenziale begrenzt bleiben. Sie belaufen sich im Jahr 2020 auf zusätzliche 230.000 m³ an vermiedenem Abbau von Naturgestein, was einer Steigerung des Ressourcenschonungspotenzials um weitere 8 % entspricht.

Die Modellannahmen der Aufbereitung gehen weiter von einer Ausschleusung nicht geeigneter Materialanteile und Aufbereitungsverluste in Höhe von 40 % aus. Dabei wird eine Absiebung der Feinfraktion mit einem Korndurchmesser bis ca. 5 mm unterstellt. Würde die Grenze abzusiebender Feinanteile anstatt der derzeit üblichen 5 mm oder größer entsprechend der gültigen Zulässigkeitsgrenze mit 2 mm Korndurchmesser angenommen werden, würde sich der Aufbereitungsverlust weiter verringern. Dagegen spricht allerdings die Anhäufung von Stoffkomponenten mit ungünstigen Wirkungen auf die Betonherstellung in der Feinfraktion kleiner 4 bis 5 mm. Technische Ansätze, die hier nachhaltige Veränderungen bewirken könnten, sind derzeit nicht in Aussicht. Aus diesem Grunde wird angenommen, dass in dieser Richtung mittelfristig keine signifikante Steigerung des Ressourcenschonungspotenzials zu erwarten ist.

Damit markieren die Modellannahmen zur sortenreinen Erfassung von Beton- und Ziegelfractionen und zur Ausschleusung ungeeigneter Stoffanteile ambitionierte technische Obergrenzen. Diese können derzeit nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand bzw. unter Inkaufnahme eines Qualitätsabfalls im erzeugten Rezyklat überschritten werden. Als Ansatzpunkte, um das erreichbare Ressourcenschonungspotenzial weiter zu steigern, sind sie daher vorerst von nachrangiger Bedeutung.

In der Langfristbetrachtung verschieben sich die Verhältnisse zwischen dem Materialoutput aus dem Gebäudebestand und dem Materialinput in den Gebäudebestand. Aus der sich abzeichnenden demografischen Dynamik lässt sich ableiten, dass im Jahr 2050 insbesondere im Wohnungsbau der Abriss den Neubau nahezu flächendeckend deutlich übersteigen wird. Möglicherweise wächst das Gewerbegebäudelager langfristig weiter an, verglichen mit der mittelfristigen Perspektive allerdings mit einer deutlich geringeren Dynamik.

Durch die dann insgesamt rückläufige Neubautätigkeit verringert sich langfristig das im Hochbaubereich durch hochwertiges Recycling maximal zu erzielende Ressourcenschonungspotenzial. Sowohl in Ostdeutschland wie auch in Westdeutschland kann mit dem potenziell verfügbaren RC-Granulat die technisch gesetzte Obergrenze der Substitution von

Betonzuschlag erreicht werden. Die Modellrechnungen weisen das erreichbare Ressourcenschonungspotenzial für das Jahr 2050 mit 3,3 Mio. m³ aus. Dies entspricht einem Rückgang um ca. 20 % gegenüber dem entsprechenden Wert aus dem Jahr 2020. Gleichzeitig wird sich – bezogen auf hochwertiges Recycling – langfristig flächendeckend ein Überangebot an RC-Material einstellen. Dieses wird für das Jahr 2050 auf 6,2 Mio. m³/Jahr geschätzt, was gegenüber dem für das Jahr 2020 ausgewiesenen Wert eine Steigerung um Faktor 3,4 bedeuten würde.

Langfristig ist das maximale technische Ressourcenschonungspotenzial durch hochwertiges Recycling mit dem aus mineralischem Hochbauabfall gewinnbaren RC-Material vollständig erreichbar. Die Aufmerksamkeit verlagert sich auf die anwachsende Menge verfügbarer RC-Gesteinskörnungen, die aufgrund der rückläufigen Bautätigkeit nicht in den Bereich des Hochbaus rückführbar sind.

7.2 Ansatzpunkte zur Stärkung des hochwertigen Recyclings

Die vorgenommene Quantifizierung erreichbarer Ressourcenschonungspotenziale zeigt eindrücklich die Notwendigkeit, im Bemühen um eine möglichst weitreichende Implementierung hochwertigen Recyclings den räumlichen und zeitlichen Aspekten einen höheren Stellenwert einzuräumen. Räumliche und zeitliche Disparitäten prägen die zukünftige Gebäudebestandsentwicklungsdynamik. Das sich dabei abzeichnende heterogene Bild macht die erheblichen Unterschiede deutlich, denen auf dem Weg zum höherwertigen Recycling vor dem Hintergrund langfristiger Planungserfordernisse bei der Rohstoffbereitstellung adäquate Beachtung entgegengebracht werden muss. Vor dem Hintergrund langfristig disparater Entwicklungen wird die Stärkung der Planungssicherheit an Bedeutung gewinnen.

Der in dieser Studie vorgelegte Modellansatz liefert hierzu einen ersten Beitrag einer regionalisierten prognostischen Modellierung relevanter Stoffkreisläufe für ein hochwertiges Recycling. Die für die Interpretation der erreichbaren Ressourcenschonungspotenziale gesetzten Systemgrenzen erscheinen allerdings noch zu eng gezogen. So erfolgt eine Fokussierung auf die Recyclingstoffströme im Hochbau im engeren Sinne mit der Betrachtung abgehender Bauabfallströme aus dem Gebäudebestand, deren Erfassung und Aufbereitung, der Nachfrage nach Baustoffen im Gebäudeneubau sowie darin einbringbare RC-Mengen. Angelagerte Rohstoffquellen und -senken, die die Rahmenbedingungen des skizzierten Bereiches wesentlich mitbestimmen, konnten nicht berücksichtigt werden. Dies betrifft vor allem weitere, das Baustoffangebot beeinflussende Rohstoffe – bspw. verfügbare Primärgesteinskörnungen – aber auch das erheblich breitere Spektrum an möglichen „Senken“ für RC-Produkte. Hier bestehen Abhängigkeiten zum betrachteten System des hochwertigen Recyclings, die möglicherweise ähnlichen räumlichen und zeitlichen Disparitäten unterliegen. Überdies wird mit den Anwendungsfällen des Hochbaus, die vor allem auf anspruchsvolle Betone, aber damit nur auf einen begrenzten Ausschnitt an Betonanwendungen ausgerichtet sind, hochwertigem Recycling nur eine deutlich verengte Betrachtungsperspektive gegeben. Mengenbezogen interessante Einsatzbereiche bieten indes auch Betonanwendungen in den Bereichen des Tief-, Straßen- oder auch Gehweg-, Kanal- und Rohrleitungsbaus.

Ein wesentlicher Schritt zur Stärkung der Planungssicherheit für hochwertiges Recycling liegt in der Erweiterung der räumlich und zeitlich differenzierten Wissensbasis. Dies bedarf der

konsequenter Weiterentwicklung von entsprechend ausgestalteten Analyseansätzen unter Einbezug all jener Quellen und Senken, die wesentlich die Rahmenbedingungen eines hochwertigen Recyclings mitbestimmen.

Die vorliegende Studie fokussiert auf den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen als Betonzuschlagstoff im Hochbau. Dabei tritt u. a. die Bedeutung des Anteilsverhältnisses von Beton und Ziegel im einzubringenden RC-Granulat zutage. So beeinflusst der Ziegelanteil im RC-Zuschlag nach gültiger Norm die substituierbare Menge an Betonzuschlag nicht unwesentlich. Dieser Aspekt darf aber nicht allein vor dem Lichte des hochwertigen Recyclings betrachtet werden. So greift eine Schlussfolgerung, bei ausreichendem Angebot an RC-Betongranulat auf eine Einbringung von Ziegel weitestgehend zu verzichten, um die maximale technische Substitutionsmenge zu erreichen, zu kurz. Hierbei ist u. a. zu bedenken, dass für die Verwendung von Ziegel insgesamt eingeschränkte Möglichkeiten bestehen und sich der Bereich des Tiefbaus dabei nahezu ausschließt, während dies für Betongranulate nicht gilt. Die Verwertung von Ziegelrezyklaten im Hochbau erhält in einem erweiterten Betrachtungsrahmen größere Bedeutung.

Hierbei kann beispielsweise auf Initiativen in Sachsen verwiesen werden, wo seitens des staatlichen Hochbauamtes aktuell geprüft wird, inwieweit die Umsetzung des Passivhausstandards in öffentlichen Bauten unter Einbeziehung einer Verwertung bspw. auch für Ziegelsplitt erfolgen kann. Entgegen des bislang vorherrschenden Trends der Errichtung schlanker aber hochfester und gedämmter Wandkonstruktionen wird untersucht, ob adäquate funktionale Eigenschaften ebenso durch die Verwendung höher dimensionierter Wandquerschnitte erreicht werden können, die geringere Festigkeitsanforderungen an das Baumaterial stellen, dadurch aber auch höhere Anteile an Ziegelrezyklat erlauben und gleichzeitig bessere Dämmeigenschaften aufweisen⁶⁸.

Mit der verfügbaren Technik und den entwickelten Verfahren bestehen erhebliche Potenziale der verbesserten Kreislaufführung mineralischer Rohstoffe im Hochbau. In der Praxis wird hiervon jedoch bislang wenig Gebrauch gemacht. Neben regionalen Disparitäten beim anfallenden und nachgefragten RC-Material ist dies insbesondere auch auf eine mangelnde Wissensbasis und Akzeptanz bezüglich der Verwendung von RC-Material für Anwendungen im Hochbau zurückzuführen. Belege hierfür lieferten die im Rahmen des Vorhabens zahlreich geführten Expertengespräche. Ergänzend hierzu kann auf aktuelle Arbeiten im Auftrag des Umweltbundesamtes verwiesen werden, die sich schwerpunktmäßig diesen Fragen widmen (UBA 2008b). In der Studie wird darauf hingewiesen, dass, obgleich „das Recycling von mineralischen Abfällen heute schon eine große Rolle spielt, [...] noch zahlreiche Maßnahmen notwendig sind, um die Akzeptanz und die Marktstellung der Recyclingprodukte nachhaltig zu verbessern“ (UBA 2008b:101). Vorgeschlagen werden Anstrengungen zur Schaffung neuer Absatzmärkte für hochwertige Anwendungen, die Herausstellung des Wertes von Recycling zur Schonung von natürlichen Ressourcen entlang der gesamten Akteurskette, Ansätze zur Internalisierung externer Kosten, die Übernahme einer Vorreiter-

⁶⁸ Hinweise von Herr van Reimersdahl (Sächs. Staatsminist. für Finanzen) beim zum Fachgespräch „Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen“ am 20.01.2010 im Umweltbundesamt in Berlin

und Vorbildrolle der öffentlichen Hand, klare Gesetzesvorgaben hinsichtlich der Gewährleistung, sowie Anstrengungen zur Sicherung von Güte und Qualität im gesamten Stoffkreislauf. Ebenso erforderlich sei eine Stärkung des Know-Hows und der Kompetenz auf der Einsatzseite durch gut kommunizierte, anwendungsorientierte Ausbildung und Forschung. Dies wird mit den Ergebnissen der Recherchen bestätigt, die im Rahmen der hier vorliegenden Studie durchgeführt wurden, wonach die Thematik des Einsatzes rezyklierter Gesteinskörnungen als Betonzuschlagsstoff bisher kein durchgängiger Bestandteil der baukonstruktiven Lehre ist und die Vermittlung gangbarer Wege hochwertigen Recyclings damit nicht ausreichend erfolgt.

Die Verbreiterung der Wissensbasis auf unmittelbarer Akteursebene und die Steigerung der Akzeptanz ist damit eine der zentralen Herausforderungen im Rahmen einer Strategie der Förderung des hochwertigen Recyclings.

In diesem Zusammenhang ist ein besonderes Augenmerk auf die Untermauerung des Begründungszusammenhangs zu legen. So gilt es nachvollziehbar darzustellen, dass durch die Verwendung von RC-Material im Hochbau diese Materialien anderen Einsatzfeldern, wie beispielsweise dem Straßenbau oder der Grubenverfüllung, nicht zugleich entzogen werden und dort wiederum durch Naturmaterial kompensiert werden müssen. Auch Sachverhalten von adversen Effekten, bspw. aufgrund erhöhter Erfordernisse an Zement bei der Nutzung von Sekundärgesteinskörnungen im Betonbau, muss dabei weitere Beachtung geschenkt werden.

Eine erweiterte Quantifizierung entlang des bereits oben eingeforderten Ansatzes unter Einbeziehung weiterer Quellen und Senken bietet hier einen wichtigen Einstiegspunkt. Sie muss neben dem Bereich des Hochbaus insbesondere auch die Verwertungsoptionen des Tiefbaus mit einbeziehen. Steigende Abgangsmengen im Hochbau und rückläufige Investitionstätigkeiten im Tiefbau könnten hier zu Mengenverhältnissen führen, die die Stellung des hochwertigen Recyclings deutlich stärken. Auch gilt es in diesem Zusammenhang kritisch zu hinterfragen, inwieweit die im Tiefbau eingesetzten RC-Materialien in der vorgenommenen Weise konstruktiv zu rechtfertigen sind. Möglicherweise lenkt der Tief- bzw. Straßenbau mit seinen hohen Verwertungsmengen von den Grundfragen ab, die auf eine ressourcenschonende Errichtung und Erneuerung von technischen Infrastrukturen orientieren. Ähnliches gilt für den Bereich der Rekultivierung von Abbauflächen, worauf bereits in (UBA 2008b) hingewiesen wird.

Dieser erweiterte und um die genannten Aspekte angereicherte Bilanzierungsansatz legt nahe, die Durchlässigkeit von RC-GK zwischen Hochbau und Tiefbau stärker in den Vordergrund zu stellen. Recycling sollte gesamtwirtschaftlich und über alle möglichen Anwendungsbereiche hinweg betrachtet werden, ohne eine Rohstoffsubstitution nur an bestimmten Absatzlinien zu fordern.

Die Frage nach der ökologischen Bedeutung des hochwertigen Recyclings ist allerdings vielschichtig zu erörtern. Die vorliegenden Argumente hinsichtlich der Umweltwirkungen aus einem potenziell erhöhten Zementbedarf, der nach derzeitigem Praxisstand nicht auszuschließen ist, wiegen schwer. Einfache Schätzungen einer verminderten Flächenneuinanspruchnahme, aus Tagebauaktivitäten zur Bereitstellung von Primärmaterial tragen nur

bedingt dazu bei, diese zu entkräften. Eine umfassende Bilanzierung der Umweltwirkungen im Sinne einer Ökobilanz könnte helfen, diese Diskussion zu versachlichen und bestehende Missstände besser zu adressieren. Dabei ist ein besonderes Augenmerk auf die Verwendung geeigneter Indikatoren zu richten, entlang derer die unterschiedlichen Wirkungskategorien dargestellt werden. Die besondere Bedeutung und Herausforderung liegt dann in der Interpretation der zu erwartenden Ergebnisse. Keinesfalls darf aus einem Umweltwirkungsprofil, das keine eindeutige Empfehlung für hochwertiges Recycling zulässt, vorschnell der Schluss gezogen werden, die Anstrengungen in dieser Richtung zu verringern. Es ist zu bedenken, dass es sich bei den technologischen Entwicklungen des hochwertigen Recyclings noch um vergleichsweise „junge“ Technologien handelt, die sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden. Experten sehen hier noch erhebliche Entwicklungschancen bei der Rezyklatgewinnung sowie der Baustoffherstellung mit Sekundärmaterial. Ökobilanzielle Nachteile gegenüber bereits etablierten und entsprechend optimierten Ansätzen, die für Technologien in frühen Entwicklungsstadien typisch sind (s. auch Entwicklungsgeschichte der Solartechnologie) dürfen nicht zwangsweise zum vorschnellen Abbruch der laufenden Entwicklungen führen. Vielmehr zeigt sich, dass Lernkurveneffekte bei der Etablierung von Technologien erheblich zur Senkung der ökobilanziellen Wirkungspotenziale beitragen.

Ergebnisse einer ökobilanziellen Betrachtung können aber wertvolle Hinweise geben, in welche Richtung Anstrengungen der technologischen Weiterentwicklung der Aufbereitungstechnik sowie der Technologie der Baustoffherstellung gelenkt werden müssten, um möglicherweise bestehende ökobilanzielle Nachteile der Bauabfallverwertung im Hochbaubereich gegenüber weiteren Recyclingoptionen abzubauen.

Literatur

AbfRRL (Europäischen Abfallrahmenrichtlinie) (2008): Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Amtsblatt der Europäischen Union L 312 vom 22.11.2008.

Andrä, H.-P.; Schneider, R.; Henning, W.; Forster, C. (1995): Einsparung von Ressourcen im Hochbau: Reduzierung des Material- und Energieverbrauchs – Planungs- und Entscheidungsgrundlagen. Reihe Umweltforschung in Baden-Württemberg, Landsberg.

Arbeitsentwurf eines Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts, Artikel 1: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG), Bearbeitungsstand 23.02.2010.

Baccini, P.; Brunner, P. (1991): Metabolism of the Anthroposphere. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg.

Banse, J.; Effenberger, K.-H. (2006): Deutschland 2050 – Auswirkungen des demographischen Wandels auf den Wohnungsbestand. IÖR Texte 152, Dresden.

BBR (2004a): Aktuelle Daten zur der Städte, Kreise und Gemeinden, Ausgabe 2003. Bundessamt für Bauwesen und Raumordnung, Berichte, Band 17, Bonn.

BBR (2004b): Wohnungsmärkte in Deutschland. Ausgabe 2004. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Berichte, Band 18. Bonn.

BBR (2005a): Raumordnungsbericht 2005. Bundessamt für Bauwesen und Raumordnung, Berichte Bd. 21, Bonn.

BBR (2005b): Raumordnungsprognose 2020/2050 - Bevölkerung, private Haushalte, Erwerbspersonen, Wohnungsmarkt. Bundessamt für Bauwesen und Raumordnung, Berichte Bd. 23, Bonn

BBR (2009): Raumordnungsprognose 2025/2050. Bevölkerung, private Haushalte, Erwerbspersonen. Bundessamt für Bauwesen und Raumordnung, Berichte Bd. 29, Bonn

BBS (Bundesverband Baustoffe – Steine Erde e.V.) (Hrsg.) (2006): Aufgaben, Themen und Ziele. Berlin.

Behler, K. (2002): Betonbrechsande in sandreichen Betonen. In: Baustoff Recycling + Deponietechnik (BR) 18(6) S. 25 - 28.

Behler, K.; Meyer, A. (2002): Untersuchungen zum Einsatz von Betonbrechsanden in sandreichen Betonen. Schlussbericht AiF-Forschungsvorhaben-Nr. 12349, Bremen.

Bilitewski, B. et al. (1995): Vermeidung und Verwertung von Reststoffen in der Bauwirtschaft. Berlin. E. Schmidt. (Beiheft zu „Müll und Abfall“, 30)

BKI (o. A.): Kostenplaner mit Baukostendatenbank des Baukosteninformationszentrums Deutscher Architektenkammern (KOSTENplaner 11).

Breit, W. (o. A.): Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt – Sachstand und neuere Untersuchungen. URL http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/BetontechnischeBerichte/145-168_Chloridgehalt.pdf.

Buchert, M. et al. (1999): Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung. UBA-Texte 47/99, Berlin.

Buchert, M. et al. (2004): Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich öffentliche Infrastruktur. UBA-Texte 01/04, Berlin.

Buchgeister, J. (2005): Vergleichende Ökobilanz unterschiedlicher Verfahrenswege zur Betonherstellung. PPT-Präsentation zum Doktorandenseminar des Netzwerks Lebenszyklusdaten vom 15./16. Juni 2005, Bad Urach, Forschungszentrum Karlsruhe

- Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V. (2004) (Hrsg.): Bauberatung Zement - Gesteinskörnungen für Normalbeton. Zement-Merkblatt Betontechnik. B 2 10.2004.
- Bundesvereinigung Recycling-Baustoffe e.V. (2005) (Hrsg.): Recycling-Baustoffe nach europäischen Normen. Leitfaden für die Überwachung und Zertifizierung, Kennzeichnung und Lieferung, Berlin/Duisburg.
- DAfStb (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton) (2002): Richtlinie des „Beton mit rezykliertem Zuschlag“.
- DAfStB (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton) (2004): Richtlinie - Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie) - Teil 1: Allgemeines - Teil 2: Gesteinskörnungen mit Opalsandstein und Flint - Teil 3: Gebrochene alkaliempfindliche Gesteinskörnungen.
- Daxbeck, H.; Neumayer, S.; Skutan, S. (2008): Stoffflussanalyse des Gebäudeabbruchs – Methodenentwicklung. In: DepoTech 2008. Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Deponietechnik und Altlasten. VGE Verlag GmbH.
- Dehoust, G. Küppers, P. (2007): Aufkommen, Qualität und Verbleib mineralischer Abfälle. Endbericht zum UBA Forschungsvorhaben FKZ 204 33 325. Dessau.
- Deilmann, C.; Gruhler, K. (2009): Resource-related parameters of industrial and commercial structures: Data base for assessing urban developments. Tagungsband zur Konferenz "ConAccount 2008 - Urban metabolism: measuring the ecological city" in Prag.
- Die Bundesregierung (2008): Zwischenbilanz der Rohstoffaktivitäten der Bundesregierung (Schwerpunkt nichtenergetische Rohstoffe).
- Diedrich, R. (1998): Einfluss der Brechwerkzeuge auf die Eigenschaften von Recycling-Granulaten im Hinblick auf eine Eignung als Zuschlag für Beton nach DIN 1045. URL <http://www.b-im.de/Berichte/Z0198frame.htm>.
- Diedrich et al. (2001): Rückenstützbetone mit Recyclingzuschlägen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF11414N.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (2005): Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau. DIN 277
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (o. A.): Deutsche Norm: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. DIN 4226-100:2002-02.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (o. A.): DIN EN 12620:2008-07, Gesteinskörnungen für Beton
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (o. A.): DIN EN 12620:2003-04 Gesteinskörnungen für Beton, inzwischen vorliegend in aktueller Version EN 12620:2002+A1:2008 Gesteinskörnungen für Beton.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (o. A.): DIN EN 206-1 :2001-07, Beton – Teil 1: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (o. A.): DIN V 20000-103:2004-04, Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (2008): DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung) (1999): Langfristige Entwicklung des Verbrauchs wichtiger Steine- und Erdenrohstoffe in der Bundesrepublik Deutschland. Gutachten im Auftrag des Bundesverbandes Baustoffe - Steine Erden e.V. In: Bundesverband Baustoffe - Steine Erden e.V. (Hrsg) (1999): Der Bedarf an mineralischen Baustoffen, Frankfurt/Main.

- Effenberger, K.-H.; Deilmann, C. (2004): Sachsen 2050 – Auswirkungen des demografischen Wandels auf den Wohnungsmarkt. IÖR-Texte 145, Dresden.
- Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (2007): Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat. Sachstandsbericht. Dübendorf/Wildegg.
- ENTSORGA gemeinnützige Gesellschaft mbH zur Förderung der Abfallwirtschaft und der Städtereinigung (1997) (Hrsg.): Kreislaufwirtschaft in der Praxis Nr. 6, Verwertung von Bauschutt, Köln.
- EU-LIFE Environment Demonstration Project (LIFE00 ENVD/000319) (2004): Vollständige Verwertung der Sandfraktion aus dem Bauschuttrecycling – RECDEMO
- Europäischen Baustoff-Recycling Verband (2005): Datenerfassung des Europäischen Baustoff-Recycling Verband, F.I.R., Österreichischer Güteschutzverband. GSV, Salzburg (Austria).
- EUWID Re (2009): Europäischer Wirtschaftsdienst Recycling und Entsorgung. Ausgabe Nr. 43 vom 20.10.2009, S. 30
- Fa. Eberhard: Beispiele und Erfahrungen zum Einsatz von RC-Beton in der Schweiz. Präsentation im Rahmen des Pilotprojektes Recyclingbeton Ludwigshafen vom 30.06.2009
- Fleckenstein, K.; Hochstrate, K.; Knoll, A.; Billek, B. (1998): Prognose der mittel- und langfristigen Nachfrage nach Baurohstoffen. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Forschungsberichte, Heft 85
- Freistaat Sachsen (2004): „Die Platte“. Hinweise zum Abbruch von Plattenbauten und zur Entsorgung des entstehenden Abfalls. Dresden
- Fricker, G.; Kaufmann, R. (2008): Rohstoff Kupfer - Gewinnung und Recycling. URL http://www.avut.ch/downloads/Referat_Rohstoff_Kupfer_Fricker_Gabriel_Kaufmann_Rene.pdf Zugriff am 04.11.2009.
- Görg, H. (1997): Entwicklung eines Prognosemodells für Bauabfälle als Baustein von Stoffstrombetrachtungen zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. TH Darmstadt, Schriftenreihe WAR 98, Darmstadt.
- Gottschalk, O. (1994): Verwaltungsbauten, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.
- Gruhler, K.; Böhm, R. (2008a): Analyse und Aufarbeitung von Daten der amtlichen Statistik „Bauen und Wohnen“. Werkstattbericht im Rahmen des IÖR-Projektes Gewerbestrukturen (P-223). Dresden.
- Gruhler, K.; Böhm, R. (2008b): Analyse und Aufarbeitung von Daten der BKI-Datenbank. Werkstattbericht im Rahmen des IÖR-Projektes Gewerbestrukturen (P-223). Dresden.
- Gruhler, K.; Deilmann, C.; Böhm, R., Schiller, G. (2002): Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe – Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen. IÖR-Schriften 38. Dresden.
- Heidelberg Cement AG (Hg.) (2009): Betontechnische Daten. Ausgabe 2009, Leimen.
- Henn, W. (1955): Bauten der Industrie, Band 1 und 2, Verlag Georg D. W. Callwey München
- Hoffmann, C.; Jacobs, F. (2008): Regelungen zu Recyclingbeton. In Baumaterialien 2008, S. 70-74.
- Hofmann, W.; Patt, B (2006): Konstruktionsbeton aus Mischabbruch. In tec 21 10/2006, S. 8-10.
- Hölz, H. M.; Hagge, H. (2009): Blaue Schale, grüner Kern. In Umweltmagazin 10-11, 2009, S.59-60
- INTECUS (1999): Ergebnisse aus der Untersuchung und Rückbaubegleitung von Bauobjekten im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes „Getrennthaltung von Althölzern beim kontrollierten Rückbau“, Projektlaufzeit 1998-99.
- Iwanow, I.; Eichhorn, D. (2002): Kommunale Wohnungsnachfrage - Rechenprogramm für die Prognose der Nachfrage. In: Stadtforschung u. Statistik (2002)2, S. 25-32.

- Iwanow, I.; Eichhorn, D.; Seidel, Y.; Kausch, S.; Effenberger, K.-H. (2005) Regionale Wohnungsmärkte in Baden-Württemberg bis 2015 mit Ausblick bis 2020. Studie im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Baden-Württembergische Bausparkassen. Dresden.
- IWU (Institut Wohnen und Umwelt) (1994): Empirische Überprüfung der Möglichkeiten und Kosten, im Gebäudebestand und bei Neubauten Energie einzusparen und die Energieeffizienz zu steigern (ABL und NBL). Endbericht für die „Deutsche Bundesstiftung Umwelt“ in Kooperation mit der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages. Darmstadt.
- Jeske, U. et al. (2004): Mineralische Rohstoffe für Baustoffe. FZ Karlsruhe
- Jungmann, A. et al. (1997): Bauschutttaufbereitung mit alljig-Setzmaschinen in Europa und USA. In Aufbereitungs-Technik, 10/1997. S.543-549.
- Knappe, F. (2008): Hochwertige Entsorgung mineralischer Abfälle - Hemmnisse; Präsentation zur 3. Klausur im Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes „Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe“, 16./17. Januar 2008.
- Kühne-Büning, L.; Nordalm, V.; Steveling, L (2005): Grundlagen der Wohnungs- und Immobilienwirtschaft. Frankfurt am Main, Hamburg.
- KWTB (1996-2007): Kreislaufwirtschaftsträger Bau: Monitoring-Berichte Bauabfälle. 1.-5. Ausgabe Berlin, Düsseldorf, Duisburg.
- KWTB (2001): Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau. Monitoring – Bericht Bauabfälle. Teil 2, Berlin, Düsseldorf, Duisburg.
- KWTB (2007): Kreislaufwirtschaftsträger Bau: 5. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Bezugsjahr 2004). Berlin, Düsseldorf, Duisburg.
- LIFE+-Projekt EnBa: Konzept zur nachhaltigen Nutzung von Baurestmassen basierend auf der thematischen Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling der EU. Projektbeginn Januar 2009. URL <http://enba.rma.at/>
- Merkblatt für recyceltes Brechgut aus Betonrestmassen, Ausgabe 2008, Baustoff-Recycling Bayern.
- Mettke, A. (2009): Pilotprojekt Recyclingbeton. Sind Normal und RC-Betone vergleichbar? Präsentation zum Pilotprojekt Recycling Beton in Ludwigshafen (www.rc-beton.de), Ludwigshafen.
- Meyer, M. (2008): Auswirkungen des demografischen Wandels auf den Baubestand und damit auf die Verwertungspotenziale von Bau- und Abbruchabfällen in den neuen Bundesländern. Diplomarbeit an der Hochschule Magdeburg-Stendal.
- Moriconi, C. (2007): Recyclable materials in concrete technology: sustainability and durability".- International conference "Sustainable construction materials and technologies", Coventry, UK.
- Müller (1998): Vorlesungsskript. Bauhaus-Universität, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung.
- Müller, A. (2003):: Recycling von Mauerwerkbruch – Stand und neue Verwertungswege (Teil 2). ZI 07/2003, S.42-46.
- Müller, A. (2004): Aufbereiten und Verwerten von Bauabfällen – Angebote aus der Forschung für die Praxis. Manuskript Bauhaus Universität Weimar.
- Müller, A. (2006): Recycelte Baustoffe und ihre Verwendung im Markt – Lösungsansätze für die Verwendung von RC - Material in hochwertigen Baustoffprodukten. Manuskript für Innovationsforum „Kooperationsverbund Baustoffe - Nachhaltige Produkt- und Technologieentwicklung“, Weimar.
- Müller, A. (o. A.): Baustoffkreisläufe – Stand und Entwicklung. Vortragsskript, Weimar
- Müller, B.; Siedentop, S. (2004): Wachstum und Schrumpfung in Deutschland – Trends, Perspektiven und Herausforderungen für die räumliche Planung und Entwicklung. In: Dkf – Deutsche Zeitschrift für Kommunalwissenschaften 43(I), 14-32.

- Nachrichtenblatt der Militärregierung für den Stadtkreis Stuttgart (1945): „Trümmerbeseitigung und Trümmerverwertung“. bearbeitet von O. Graf, Nr. 24, 15.Nov. 1945.
- Nachrichtenblatt der Militärregierung für den Stadtkreis Stuttgart (1946a): Richtlinien für die Aufbereitung von Trümmerschutt, Nr. 3, 17.01.1946.
- Nachrichtenblatt der Militärregierung für den Stadtkreis Stuttgart (1946b): Richtlinien für die Herstellung massiver Decken, bearbeitet von O. Graf, Nr. 8, 21.02.1946.
- Nicolai, M. (1997): Zur Konfiguration von verfahrenstechnischen Anlagen zum wirtschaftlichen Recycling von Bauschutt. Dissertation Universität Karlsruhe.
- Öko-Institut (2006): Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft zu einer nachhaltigen Stoffstrom- und Ressourcenpolitik – Teilvorhaben „Ermittlung von relevanten Stoffen bzw. Materialien für eine stoffstromorientierte ressourcenschonende Abfallwirtschaft“. Endbericht zum UBA-Forschungsvorhaben FZK 90531411. Darmstadt.
- Österreichisches Ökologie-Institut für angewandte Umweltforschung (2004): Vermeidung von Baustellenabfällen in Wien. Endbericht – Teil 3/4: Ergebnisse, Wien.
- Papke, H.-J. (1980): Handbuch Industrieprojektierung, Verlag Technik, Berlin.
- Petschow, U. (2008): Hemmnisse des Recycling und Instrumente zur Förderung des Recyclings; Präsentation zur 3. Klausur im Forschungsprojekt des Umweltbundesamtes „Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe“, 16./17. Januar 2008.
- Philip Holzmann AG; IMS Ingenieurgesellschaft mbH (Hg) (1997): Grundlagen und Perspektiven einer nachhaltigen Bauwirtschaft.
- RC-Management Center Berlin (2006): RC-news. Fachinformationsdienst der deutschen BAUSTOFF-RECYCLING BRANCHE. Heft 1/2006, S.6 ff.
- Roos, F. (2002): Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1. Dissertationsschrift, TU München.
- Rubli, S. (2005): Potentiale von mineralischen Sekundärressourcen. Resultate; weiteres Vorgehen, Dokumentation zum Workshop 2005, Zürich.
- Satlow Ch.; Zurita A.; Pretz Th. (2002): Copper in different types of buildings as a secondary deposit. RWTH-Aachen.
- Schäfer B. (2009) (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V.); persönliche Mitteilung
- Schäfer, T. (2004): Untersuchungen zur Dispersion und ihren Auswirkungen beim Übergang aus der Nutzungsphase in das Recycling. Diss. WTH Aachen, Jülich.
- Schäfer, W.: Beton-Seminar (2009): Präsentation. URL http://www.bauwesen.hs-magdeburg.de/bwnet/Betonseminar/2009/pdf/Schaefer_Regelanderungen_Betontech.pdf, Zugriff: 16.11.09
- Schießl, P. (2003): Entwicklungstendenzen im Stahlbetonbau. Schrift beim Institut für Stahlbetonbewehrung e.V.
- Schießl, P. (2008): Nachhaltige Kreislaufführung mineralischer Rohstoffe. In Ökobau III Von nachwachsenden und kompostierbaren Häusern. Dokumentation des Fachgesprächs vom 10. März 2008 in Berlin, Schriftenserie von Bündnis90/Die Grünen 16/133, Berlin.
- Schießl, P. et al. (2006): Nachhaltige Kreislaufführung mineralischer Baustoffe. Forschungsbericht Nr.: F2032 für das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, München.
- Schmidt Consult (1999): Technische, ökologische und wirtschaftliche Einflüsse auf die derzeitigen und zukünftigen Mengen an rezyklierten Baustoffen. Gutachten im Auftrag des Bundesverbandes Baustoffe- Steine und Erden e.V., Heidelberg.

- Schulz, I (2006): Baustoffrecycling in Deutschland und im globalisierten Europa – Ist-Situation und Zukunftschancen. BBR - Informationsgespräch (Workshop): Vom Abfall zum Baustoff Umgang mit Bauabfällen – Einsatz von Recyclingmaterial Bonn, 28.November 2006.
- Silbe, K. (1999): Wirtschaftlichkeit kontrollierter Rückbauarbeiten. Mensch-und-Buch-Verlag, Berlin.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2007): Statistik lokal – Ausgabe 2007 (Gebietsstand 31.12.2005).
- Statistisches Bundesamt (1991-2007): Statistische Jahrbücher für die Bundesrepublik Deutschland für die Jahre 1991 bis 2007.
- Statistisches Bundesamt (1999): Bautätigkeit und Wohnen. Fachserie 5, Reihe 1 Bautätigkeit 1997, Metzler-Poeschel Verlag, Stuttgart.
- Statistisches Bundesamt (2004): Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen 2003. Fachserie 5, Reihe 3. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2005): Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen 2004. Fachserie 5, Reihe 3. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2006): Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen 2005. Fachserie 5, Reihe 3. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2008a): Bautätigkeit und Wohnungen. Bestand an Wohnungen 2007. Fachserie 5, Reihe 3. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2008b): Bautätigkeit und Wohnungen, Mikrozensus-Zusatzerhebungen 2006, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte. Fachserie 5, Heft 1
- Statistisches Bundesamt (2000-2006): Fachserie 19, Reihe 1 Umwelt Abfallentsorgung. Jährliche Erscheinungsreihe des Statistischen Bundesamtes Wiesbaden
- Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt (2009): Wohnungswesen, Bautätigkeit - Baugenehmigungen im Wohn- und Nichtwohnbau - Statistische Berichte, Halle (Saale).
- Technische Hochschule Darmstadt, (1998): Forschungsvorhaben Baustoffkreislauf im Massivbau (BiM). Veröffentlichung von Projektergebnissen. URL <http://www.b-i-m.de/>
- TU Wien (2007): Baurestmassen in Oberösterreich: Stoffbilanz der Bauwirtschaft, Wien.
- UBA (Hg.) (2008a): Demographischer Wandel – eine Herausforderung für die Abfallwirtschaft? Workshop im Umweltbundesamt am 14.11.2007 – Dokumentation, Dessau.
- UBA (Hg.) (2008b): Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgut- und anwendungsbezogener Anforderungen des potentiellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente. UBA-Forschungsvorhaben FKZ 206 31 304/01. Endbericht.
- UBA (Hg.) (2008c): Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgut- und anwendungsbezogener Anforderungen des potentiellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente. UBA-Forschungsvorhaben FKZ 206 31 304/01. Kurzfassung.
- Universität Stuttgart (2006): Zum Gedenken an Otto Graf, universeller Bauforscher in Stuttgart. Abschiedsvorlesung von Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt am 4. Juli 2006. Reden und Aufsätze 71, Stuttgart.
- Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) 1998-2006): Betontechnische Berichte von 1998 – 2006. URL: <http://www.vdz-online.de>.
- Weil, M. (2004): Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen. Dissertation TU-Darmstadt, WAR-Serie Heft 160, Eigenverlag TU Darmstadt.

Weil, M.; Jeske, U. (2004): Ökologische Positionsbestimmung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen. Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technische Chemie, Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme.

Weil, M.; Jeske, U.; Schebek, L. (2002): Stoffstromanalyse und Ökobilanz als Hilfen zur umweltorientierten Positionsbestimmung von Beton mit und ohne rezykliertem Zuschlag im mineralischen Baustoffstrom. In: Technikfolgenabschätzung, Nr. 1/11, S. 50-64. URL <http://www.itas.fzk.de/tatup/021/weua02a.htm> .

Wenzel, K. (1967): Hotelbauten. Verlag für Bauwesen, Berlin.

Werner, W.; Kimmig, B.; Liedtke, M.; Kesten, D.; Kleinschnitz, M.: Rohstoffförderung in Baden-Württemberg Stand, Entwicklung und Bundesvergleich. In Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 5/2007.

Wittmer, D. (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt. Diss. ETH Zürich.

Wöhnl, U. (1994): Recyclingbeton für Bauteile im Hochbau. In Beton 9/94, S. 499-503

Glossar

Begriff	Begriffliche Erläuterung/Unterscheidungsdetails	Anmerkungen
Belegungskennziffer	Haushalte pro Wohnung	
Bereitstellungspotenzial	Menge an für den Betonbau einsetzbarem Rezyklatmaterial, die sich aus mineralischem Hochbauabfall zur Verfügung stellen lässt.	
Bestandsentwicklung	Abbildung möglicher Veränderungen des Gebäudebestandes	
Betongruppen	BI und BII (Beton letzterer Gruppe [ab B35] bedürfen der Eignungsprüfung und unterliegen der Fremdüberwachung [B 55 insbes. für Betonfertigteile])	
Betongüteklassen	= Betonfestigkeitsklassen, B oder C/Zahlenwert (letzterer gibt die minimale Druckfestigkeit in N/mm ² für bestimmte Ausformungen nach 28 Tagen Aushärtung bei definierten Lagerbedingungen an) B (alt), C (neu = DIN EN 206-1, DIN 1045-2)	siehe u. a. Zuordnung zu normal- und hochfestem Beton
Betonsplit	aus Betonbruch hergestellter Zuschlag > 4mm	
CE-Prüfzeichen	Hersteller, die ihre Produkte in die Europäische Gemeinschaft importieren oder innerhalb der EG produzieren, sind seit dem 01.01.1996 gesetzlich dazu verpflichtet, dieses Zeichen auf ihren Erzeugnissen zu führen	
Erwerbspersonen	Personen, die eine unmittelbar oder mittelbar auf Erwerb gerichtete Tätigkeit ausüben oder suchen. Sie setzen sich zusammen aus den Erwerbstätigen und den Erwerbslosen.	
Expositionsklassen ^j	Beschreiben die chemischen und physikalischen Umgebungsbedingungen, denen ein Betonbauteil ausgesetzt werden kann und die nicht als Lastannahmen in die Tragwerksplanung eingehen.	
Festigkeitsklasse	Nach ihrer Qualität werden Materialien und Baustoffe eingeteilt und benannt. Die Klassifikation erfolgt aufgrund der Druckfestigkeit.	
Hochwertiges Recycling	Eine Kreislaufführung im Hochbau, die auf dem Wiedereinsatz mineralischer Fraktionen aus dem Hochbau im Hochbau beruht.	
Liefertyp 1	Hierbei ist ein Verhältnis von Beton-RC-Gesteinskörnungen zu Ziegel-RC-Gesteinskörnungen von 90:10 zulässig	
Liefertyp 2	Hierbei ist ein Verhältnis von Beton-RC-Gesteinskörnungen zu Ziegel-RC-Gesteinskörnungen von 70:10 zulässig	
Liefertyp L*	optimierter Liefertyp aus dem das höchste Ressourcenschonungspotenzial resultiert	
Liefertypen	Unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich der zulässigen Anteile an Beton-RC-GK und Ziegel-RC-GK sowie hinsichtlich der zulässigen maximalen Substitutionsmengen natürlicher GK.	
Mikrozensus	Eine repräsentative 1 %-ige statistische Erhebung der Privathaushalte Deutschlands.	
Nichtwohngebäude	Hierunter werden Gebäude gefasst, „die überwiegend für Nichtwohnzwecke bestimmt sind, d.h. Gebäude, in denen mehr als die Hälfte der Gesamtnutzfläche Nichtwohnzwecken dient“ (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt 2009)	

Begriff	Begriffliche Erläuterung/Unterscheidungsdetails	Anmerkungen
Potenzielle Baustoffströme	Baustoffabgang sowie der Baustoffzugang in den und aus dem Gebäudebestand, der durch die Bestandsveränderungen resultiert.	Projektinterne Begriffsfestlegung
Potenzielle RC-Stoffströme	Die Berechnung potenzieller Mengen an RC-Gesteinskörnungen, die aus den abgehenden Bauabfallstoffströmen durch entsprechende Aufbereitung gewonnen werden können	Projektinterne Begriffsfestlegung
Recyclingrelevante Baustoffe	„Recyclingrelevant“ sind im Sinne der Ausrichtung dieser Studie Betone und Ziegel des Baustoffabgangs, da hieraus RC-Gesteinskörnungen hergestellt werden können, die als RC-Zuschlag in Betone zulässig sind, sowie Betone des Baustoffzugangs, da diese RC-Material aufnehmen können	Projektinterne Begriffsfestlegung
Ressourcenschonungspotenzial	Unter Ressourcenschonungspotenzial (RESPOT) wird das Abbauvolumen verstanden, das durch die Substitution von Naturkiesmaterial in Betonen durch Rezyklat vermieden wird	Projektinterne Begriffsfestlegung
Rezyklate aus Bauabfällen	aus Bauabfällen aufbereitete Mineralstoffgemische Beurteilung erfolgt nach drei Merkmalen: bezogen auf die <u>Korngrößenverteilung</u> gibt es die Unterscheidung zwischen Brechsanden und Splitten. Hinsichtlich der <u>Bestandteile</u> werden betonreiche und ziegelreiche Rezyklate unterschieden, wobei porosierte Ziegel nicht berücksichtigt werden. Parallel dazu erfolgt noch eine Einteilung nach dem Merkmal <u>Rohdichte</u> , welche die Leitgröße für eine Vielzahl von Eigenschaften darstellt.	
Rezyklierte Gesteinskörnung ⁱ	aufbereitetes anorganisches Material aus Altbaustoff, Sammelbegriff für rezyklierten Split und rezyklierten Brechsand	
Technisches Substitutionspotenzial	Menge an Rezyklatmaterial, die durch Zubau in den Gebäudebestand im Rahmen technisch zulässiger Größenordnungen vom Betonbau aufgenommen werden können.	Projektinterne Begriffsfestlegung
Überwachungsklassen	Einteilung zu Prüfnotwendigkeit und -häufigkeiten in Bezug auf bestimmte Parameter u. Herstellungsphasen (Klasse 1 Prüfungen meist nur bei Zweifeln); Zuordnung zu Überwachungsklassen ergibt sich u. a. über Betonfestigkeit Kl. 1 <C25/30, Kl 2 <C50/60	
Zubau	Im Neubaubau enthaltener Anteil, durch Fertigstellung neuer Gebäude, errichteter Bauwerke	

Anlagen

Anlage 1: Mittlere Abrissquoten auf der Ebene der Verwaltungsbezirke

Tabelle A-1-1: Aus der Bautätigkeitsstatistik abgeleitete mittlere Abrissquoten, bezogen auf den Erhebungszeitraum 2002 bis 2005 (eigene Berechnung auf Grundlage von Statistisches Bundesamt, Fachserie 5, Reihe 3)

Verwaltungsbezirk	mittlere Abrissquote	
	EZFH	MFH
RB Stuttgart	0,08 %	0,11 %
RB Karlsruhe	0,05 %	0,06 %
RB Freiburg	0,05 %	0,07 %
RB Tübingen	0,06 %	0,08 %
RB Oberbayern	0,09 %	0,05 %
RB Niederbayern	0,04 %	0,04 %
RB Oberpfalz	0,04 %	0,07 %
RB Oberfranken	0,01 %	0,05 %
RB Mittelfranken	0,03 %	0,03 %
RB Unterfranken	0,02 %	0,03 %
RB Schwaben	0,03 %	0,03 %
Berlin	0,03 %	0,06 %
BB_Kreisfreie Städte zusammen	0,07 %	1,10 %
BB_Landkreise zusammen	0,03 %	0,87 %
Bremen	0,02 %	0,23 %
Hamburg	0,15 %	0,03 %
RB Darmstadt	0,05 %	0,04 %
RB Gießen	0,02 %	0,05 %
RB Kassel	0,02 %	0,04 %
MV_Kreisfreie Städte zusammen	0,05 %	0,48 %
MV_Landkreise zusammen	0,01 %	0,34 %
RB Braunschweig	0,00 %	0,01 %
RB Hannover	0,00 %	0,00 %
RB Lüneburg	0,00 %	0,00 %
RB Weser-Ems	0,00 %	0,00 %
RB Düsseldorf	0,06 %	0,06 %
RB Köln	0,03 %	0,06 %
RB Münster	0,05 %	0,07 %
RB Detmold	0,03 %	0,03 %
RB Arnberg	0,03 %	0,05 %
RB Koblenz	0,00 %	0,01 %
RB Trier	0,00 %	0,00 %
RB Rheinhessen-Pfalz	0,01 %	0,02 %
Saarland	0,02 %	0,04 %
RB Chemnitz	0,08 %	1,08 %
RB Dresden	0,07 %	0,62 %

Verwaltungsbezirk	mittlere Abrissquote	
	EZFH	MFH
RB Leipzig	0,09 %	0,57 %
RB Dessau	0,07 %	1,71 %
RB Halle	0,08 %	1,42 %
RB Magdeburg	0,05 %	1,09 %
SH_Kreisfreie Städte zusammen	0,01 %	0,15 %
SH_Landkreise zusammen	0,03 %	0,09 %
TH_Kreisfreie Städte zusammen	0,08 %	1,13 %
TH_Landkreise zusammen	0,07 %	0,76 %

Anlage 2: Operationalisierung der Interdependenzhypothesen

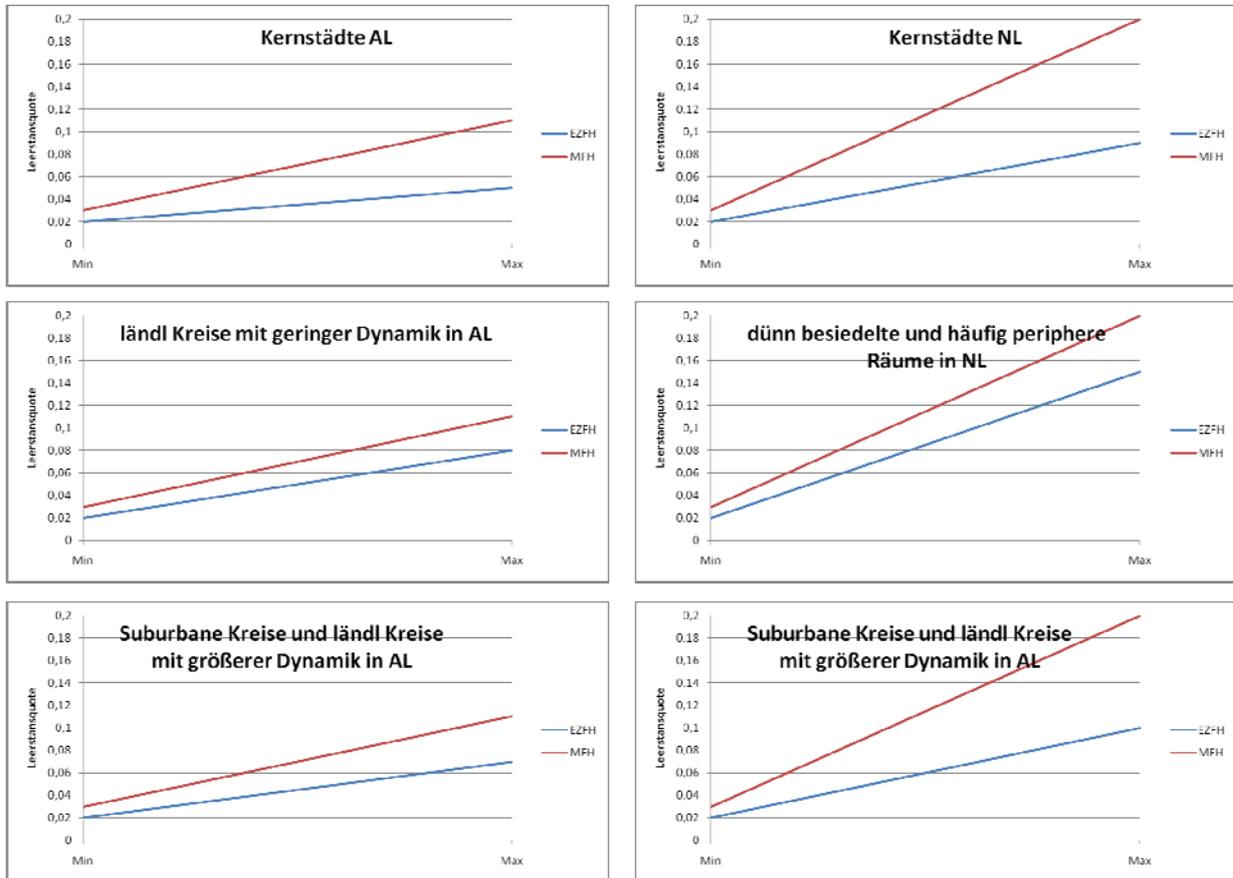


Abbildung A-2-1: Interdependenzhypothesen in den sechs Raumtypen

Anlage 3: Fortschreibung der Altersstruktur im Wohngebäudebestand bis zum Basisjahr 2005

In Deutschland erfolgten die letzten großen Vollerhebungen im Zuge der Gebäude und Wohnungszählung, für Westdeutschland 1987 und für Ostdeutschland 1995. Aktuelle Daten beruhen auf Fortschreibungen, mittels statistisch erfasster Zu- und -abgänge, des Wohnungsbestandes aus diesen Zählungen. Diese erfolgen allerdings ohne Altersklassendifferenzierung für den gesamten Wohnungsgebäudebestand. Die baustoffliche Altersklassencharakteristik, insbesondere im Beton und Ziegelbereich, erfordert für die weitere Betrachtung hingegen gerade eine solche altersklassendifferenzierte Fortschreibung.

Aufbauend auf die in Buchert et al. (2004) beschriebene Methode zur Fortschreibung des Gebäude- und Wohnungsbestandes auf Raumtypenebene, erfolgte in einem ersten Schritt für den Zeitraum 1987 - 1999 in Westdeutschland bzw. 1995 - 1999 in Ostdeutschland die Fortschreibung mittels jährlicher Abgangsquoten wie sie in Tabelle A-3-1 aufgeführt sind.

Tabelle A-3-1: Modellannahmen zum jährlichen Abriss auf den Bestand des Vorjahres

	Gesamt	EFH	MFH
BRD	0,0005	0,0005	0,0006
ABL	0,0005	0,0005	0,0004
NBL	0,0009	0,0007	0,0012

Um eine regionalisierte Betrachtung auf der Ebene der BBR-Raumtypen zu ermöglichen, wurden die auf Kreisebene fortgeschriebenen Wohnungsbestände, diesen sechs Raumtypen entsprechend, aggregiert. Die Altersklassen 1987-1999 in Westdeutschland bzw. 1995-1999 in Ostdeutschland ergaben sich hierbei als Differenz aus dem Wohnungsbestand von 1999 und der Summe der, mittels der Abgangsquoten reduzierten, Wohnungsbestände in den Altersklassen vor 1987 bzw. 1995. Die Abgangsquoten wurden dabei ohne Altersklassendifferenzierung in den zu reduzierenden Altersklassen angewendet. Bei gleichbleibender Methodik der Fortschreibung ergaben sich innerhalb der Altersklasse 1999 – 2005 im weiteren Verlauf keine plausiblen Werte mehr. Ohne genauere Untersuchung können über die Ursachen nur Vermutungen angestellt werden. Da speziell solche Kreise betroffen sind, die im Besonderen den Auswirkungen des Demografischen Wandels ausgesetzt sind, liegt die Vermutung nahe, dass die räumlich differenzierten Auswirkungen von Maßnahmen wie dem Stadtumbauost und den zugleich räumlich undifferenzierten Abgangsquoten mit zu den Hauptursachen gezählt werden können.

Unter der Annahme, dass räumlich undifferenzierte Abgangsquoten ab einem gewissen Zeitpunkt die tatsächliche Dynamik im Bestand in einem nicht mehr ausreichenden Maße abbilden, sind Abgangsquoten mit einer größeren räumlichen Auflösung erforderlich. Da die Fortschreibung auf Kreisebene erfolgt, wird diese Maßstabsebene auch bei den Abgangsquoten angestrebt. Die amtliche Statistik, die die Grundlage der Berechnung liefert, macht hierfür allerdings nur Angaben auf Regierungsbezirksebene. Den Kreisen wurden somit,

entsprechend ihrer Regierungsbezirkzugehörigkeit, durchschnittliche Abgangsquoten, ermittelt aus den Jahren 2002 - 2005, zugeordnet. Die eigentliche Fortschreibung bis 2005 wurde analog zur Fortschreibung bis 1999 durchgeführt. Für Westdeutschland ergaben sich durchweg plausible Werte, im Falle von Ostdeutschland traten in einigen wenigen Kreisen Besonderheiten auf. Diese traten, mit sechs Fällen, im Mehrfamilienhausbestand deutlich stärker auf als mit einem Fall im Ein- und Zweifamilienhausbestand. Der ersten Vermutung folgend, dass undifferenzierte Abgangsquoten die tatsächliche Dynamik im Bestand nicht ausreichend abbilden können, sind diese Besonderheiten vermutlich ebenfalls auf über bzw. unterschätzte Abgangsquoten zurückzuführen. Da im konkreten Fall negative Bestände in Ostdeutschland speziell in Kreisen auftreten in denen das Instrument des Stadtumbau-Ost zum Einsatz kam, kann hier eine unterschätzte Abrissquote angenommen werden. Der somit fehlende Abriss wurde, anteilig auf die restlichen Altersklassen, ihrem Besitz entsprechend, verteilt und die fortgeschriebene Altersklasse 1999 – 2005 auf Null gesetzt.

Des Weiteren bedarf auf Grund der realen und dementsprechenden statistischen Teilung Berlin einer speziellen Betrachtung. Wie in Tabelle A-3-2 ersichtlich, wurde der Gebäude- und Wohnungsbestand in West- und Ostberlin, hinsichtlich der Altersklassen, verschieden differenziert erfasst. Dabei wurde die unterschiedliche Altersklassenstruktur für die Angabe des Gebäude- und Wohnungsbestandes bis 1999 beibehalten. Ab 1999 erfolgte fortwährend eine räumlich einheitliche statistische Bestandsangabe. Die notwendige Zusammenführung orientiert sich hierbei an den Altersklassen Ostdeutschlands und in Abhängigkeit der sich überschneidenden Altersklassen erfolgte anteilig die Bestandneugliederung.

Tabelle A-3-2: Berlin, Bestandsaltersklassen

Berlin											
ABL	bis 1900	1901 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1987		1988 - 1999		
							3/9	6/9	3/12	5/12	4/12
NBL	bis 1900	1901 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1968		1969 - 1981		1982 - 1990		1991 - 1995	1996 - 1999

Anlage 4: Regionalisiertes Baustofflager im Wohngebäudebestand auf Kreisebene.

Tabelle A-4-1: Regionalisierte Baustofflager auf Kreisebene, differenziert nach den Baustoffhauptgruppen

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch		Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst		
davon Betone	davon Ziegel								
1001	Flensburg, Stadt	10,7	10,2	4,7	1,5	0,2	0,1	0,01	0,1
1002	Kiel, Landeshauptstadt	28,6	27,3	12,2	4,5	0,6	0,3	0,02	0,3
1003	Luebeck, Hansestadt	26,3	25,2	11,3	4,0	0,6	0,3	0,02	0,2
1004	Neumuenster, Stadt	10,2	9,8	4,7	1,2	0,2	0,1	0,01	0,1
1051	Dithmarschen	19,4	18,5	8,5	2,7	0,6	0,2	0,02	0,2
1053	Herzogtum Lauenburg	22,7	21,6	10,7	2,4	0,6	0,2	0,02	0,2
1054	Nordfriesland	25,3	24,1	11,7	3,1	0,7	0,3	0,02	0,2
1055	Ostholstein	28,9	27,6	13,9	3,0	0,7	0,3	0,02	0,3
1056	Pinneberg	37,3	35,7	18,2	3,5	0,8	0,4	0,03	0,4
1057	Ploen	17,3	16,5	8,2	1,8	0,4	0,2	0,02	0,2
1058	Rendsburg-Eckenfoerde	34,4	32,8	16,0	3,9	0,9	0,4	0,03	0,3
1059	Schleswig-Flensburg	25,5	24,2	11,3	3,5	0,7	0,2	0,02	0,2
1060	Segeberg	31,6	30,2	15,9	2,5	0,7	0,3	0,03	0,3
1061	Steinburg	17,8	16,9	7,9	2,4	0,5	0,2	0,01	0,2
1062	Stormarn	28,2	27,0	13,9	2,5	0,6	0,3	0,02	0,3
2000	Hamburg	192,2	184,6	88,4	23,9	3,6	2,1	0,11	1,8
3101	Braunschweig, Stadt	30,1	28,9	13,3	4,3	0,7	0,3	0,02	0,3
3102	Salzgitter, Stadt	13,0	12,4	5,8	1,7	0,3	0,1	0,01	0,1
3103	Wolfsburg, Stadt	14,5	13,9	7,3	1,0	0,2	0,2	0,01	0,1
3151	Gifhorn	21,5	20,4	10,4	2,1	0,6	0,2	0,02	0,2
3152	Göttingen	31,9	30,5	14,4	4,2	0,8	0,3	0,02	0,3
3153	Goslar	21,8	20,8	9,2	3,5	0,6	0,2	0,01	0,2
3154	Helmstedt	13,1	12,5	5,6	1,9	0,4	0,1	0,01	0,1
3155	Northeim	19,4	18,5	8,0	3,2	0,6	0,2	0,01	0,2
3156	Osterode am Harz	12,0	11,4	5,0	1,9	0,4	0,1	0,01	0,1
3157	Peine	17,7	16,9	7,9	2,4	0,5	0,2	0,02	0,2
3158	Wolfenbuettel	16,2	15,4	7,1	2,2	0,4	0,2	0,01	0,2
3251	Diepholz	26,8	25,5	12,4	3,1	0,7	0,3	0,03	0,3
3252	Hamel-Pyrmont	21,8	20,7	9,5	3,0	0,6	0,2	0,02	0,2
3241	Hannover, region	135,9	130,2	64,4	14,5	2,8	1,5	0,09	1,3
3254	Hildesheim	36,8	35,1	16,2	5,0	1,0	0,4	0,03	0,3
3255	Holzminden	10,8	10,3	4,4	1,8	0,3	0,1	0,01	0,1

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch			Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst	
3256	Nienburg (Weser)	15,1	14,4	6,5	2,2	0,4	0,2	0,01	0,1
3257	Schaumburg	21,5	20,5	9,6	2,8	0,6	0,2	0,02	0,2
3351	Celle	23,6	22,5	10,9	2,6	0,6	0,2	0,02	0,2
3352	Cuxhaven	28,5	27,1	13,0	3,6	0,8	0,3	0,03	0,3
3353	Harburg	30,8	29,4	15,3	2,6	0,8	0,3	0,03	0,3
3354	Luechow-Dannenberg	7,6	7,2	3,2	1,2	0,2	0,1	0,01	0,1
3355	Lueneburg	21,1	20,1	10,2	2,2	0,5	0,2	0,02	0,2
3356	Osterholz	14,1	13,4	6,7	1,3	0,4	0,1	0,01	0,1
3357	Rotenburg (Wumme)	20,9	19,9	9,9	2,2	0,6	0,2	0,02	0,2
3358	Soltau-Fallingbostel	18,5	17,6	8,6	2,1	0,5	0,2	0,02	0,2
3359	Stade	25,5	24,3	12,3	2,6	0,6	0,3	0,02	0,2
3360	Uelzen	13,3	12,7	6,0	1,7	0,4	0,1	0,01	0,1
3361	Verden	17,2	16,4	8,1	1,9	0,5	0,2	0,02	0,2
3401	Delmenhorst, Stadt	10,2	9,7	4,8	1,1	0,2	0,1	0,01	0,1
3402	Emden, Stadt	6,5	6,2	3,0	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
3403	Oldenburg, Stadt	21,5	20,5	10,3	2,3	0,5	0,2	0,02	0,2
3404	Osnabrueck, Stadt	19,8	19,0	9,3	2,2	0,4	0,2	0,01	0,2
3405	Wilhelmshaven, Stadt	10,7	10,2	4,4	1,9	0,3	0,1	0,01	0,1
3451	Ammerland	15,3	14,5	7,5	1,3	0,4	0,2	0,02	0,2
3452	Aurich	26,6	25,3	12,8	2,6	0,7	0,3	0,03	0,3
3453	Cloppenburg	16,4	15,6	8,2	1,3	0,5	0,2	0,02	0,2
3454	Emsland	36,0	34,2	18,0	2,9	1,0	0,4	0,04	0,4
3455	Friesland	14,7	14,0	6,7	1,8	0,4	0,2	0,01	0,1
3456	Grafschaft Bentheim	16,1	15,3	7,7	1,5	0,4	0,2	0,02	0,2
3457	Leer	21,1	20,1	9,8	2,2	0,6	0,2	0,02	0,2
3458	Oldenburg	15,6	14,9	7,6	1,4	0,4	0,2	0,02	0,2
3459	Osnabrueck	41,3	39,3	19,6	4,3	1,1	0,4	0,04	0,4
3460	Vechta	14,3	13,6	7,1	1,2	0,4	0,2	0,02	0,1
3461	Wesermarsch	12,6	12,0	5,5	1,8	0,4	0,1	0,01	0,1
3462	Wittmund	8,7	8,3	4,2	0,9	0,2	0,1	0,01	0,1
4000*	Bremen/Bremerhaven	83,4	80,0	37,8	10,6	1,7	0,9	0,05	0,8
5111	Düsseldorf	67,5	65,0	31,7	8,1	1,1	0,7	0,03	0,6
5112	Duisburg	56,6	54,3	25,1	8,0	1,2	0,6	0,03	0,5
5113	Essen	68,0	65,3	30,4	9,2	1,3	0,7	0,03	0,6
5114	Krefeld	28,8	27,6	13,1	3,7	0,6	0,3	0,02	0,3
5116	Mönchengladbach	30,9	29,6	14,1	3,9	0,7	0,3	0,02	0,3
5117	Mühlheim a.d. Ruhr	20,7	19,9	9,4	2,7	0,4	0,2	0,01	0,2
5119	Oberhausen	24,0	23,0	10,8	3,1	0,5	0,3	0,01	0,2
5120	Remscheid	13,9	13,3	6,2	1,9	0,3	0,1	0,01	0,1

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch				Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst
5122	Solingen	18,7	17,9	7,8	3,2	0,5	0,2	0,01	0,2
5124	Wuppertal	42,1	40,3	18,7	6,0	0,9	0,5	0,02	0,4
5154	Kleve	36,6	34,8	17,1	4,0	1,0	0,4	0,03	0,4
5158	Mettmann	59,1	56,8	29,3	5,3	1,1	0,6	0,04	0,6
5162	Neuss	53,6	51,3	26,3	4,8	1,1	0,6	0,04	0,5
5166	Viersen	37,0	35,3	17,0	4,5	1,0	0,4	0,03	0,4
5170	Wesel	52,8	50,5	25,4	5,1	1,2	0,6	0,04	0,5
5313	Aachen	28,9	27,7	13,5	3,4	0,6	0,3	0,02	0,3
5314	Bonn	36,6	35,1	17,1	4,3	0,7	0,4	0,02	0,3
5315	Köln	111,7	107,4	53,1	12,5	1,9	1,2	0,06	1,1
5316	Leverkusen	17,8	17,1	8,3	2,1	0,3	0,2	0,01	0,2
5354	Aachen	37,0	35,3	16,7	4,7	0,9	0,4	0,03	0,4
5358	Düren	31,9	30,5	14,8	3,4	0,8	0,3	0,03	0,3
5362	Erfkreis	54,0	51,7	26,4	4,7	1,2	0,6	0,04	0,5
5366	Euskirchen	23,2	22,1	10,6	2,7	0,6	0,2	0,02	0,2
5370	Heinsberg	31,4	29,9	14,6	3,5	0,9	0,3	0,03	0,3
5374	Oberbergischer Kreis	33,9	32,3	15,4	4,1	0,9	0,3	0,03	0,3
5378	Rheinisch-Bergischer Kreis	34,9	33,3	16,7	3,5	0,8	0,4	0,03	0,3
5382	Rhein-Sieg-Kreis	70,8	67,6	34,3	6,7	1,7	0,7	0,06	0,7
5512	Bottrop	13,6	13,0	6,1	1,8	0,3	0,1	0,01	0,1
5513	Gelsenkirchen	29,8	28,6	13,0	4,4	0,6	0,3	0,01	0,3
5515	Münster	32,3	31,0	16,1	2,8	0,6	0,4	0,02	0,3
5554	Borken	40,8	38,9	19,8	3,8	1,1	0,4	0,04	0,4
5558	Coesfeld	23,6	22,5	11,6	2,0	0,6	0,2	0,02	0,2
5562	Recklinghausen	73,6	70,4	34,1	8,5	1,6	0,8	0,05	0,7
5566	Steinfurt	50,7	48,3	24,3	5,1	1,3	0,5	0,05	0,5
5570	Warendorf	32,6	31,1	15,5	3,4	0,8	0,3	0,03	0,3
5711	Bielefeld	36,9	35,4	16,9	4,5	0,8	0,4	0,02	0,4
5754	Gütersloh	41,0	39,1	19,9	3,9	1,0	0,4	0,04	0,4
5758	Herford	31,8	30,3	13,9	4,5	0,9	0,3	0,02	0,3
5762	Höxter	18,3	17,4	8,1	2,4	0,5	0,2	0,02	0,2
5766	Lippe	44,5	42,4	19,9	5,6	1,2	0,5	0,03	0,4
5770	Minden-Lübbecke	37,5	35,7	16,5	5,1	1,0	0,4	0,03	0,4
5774	Paderborn	34,2	32,7	17,0	3,0	0,8	0,4	0,03	0,3
5911	Bochum	42,2	40,5	19,2	5,4	0,8	0,5	0,02	0,4
5913	Dortmund	68,1	65,4	31,4	8,4	1,3	0,7	0,04	0,6
5914	Hagen	22,9	22,0	10,4	3,0	0,5	0,2	0,01	0,2
5915	Hamm	20,9	20,0	9,5	2,7	0,5	0,2	0,01	0,2
5916	Herne	18,7	17,9	8,2	2,8	0,4	0,2	0,01	0,2

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch				Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst
5954	Ennepe-Ruhr-Kreis	40,3	38,6	18,4	5,2	0,9	0,4	0,02	0,4
5958	Hochsauerlandkreis	34,7	33,1	15,8	4,1	0,9	0,4	0,03	0,3
5962	Märkischer Kreis	52,0	49,7	23,7	6,4	1,2	0,5	0,04	0,5
5966	Olpe	16,7	15,9	7,8	1,8	0,4	0,2	0,01	0,2
5970	Siegen-Wittgenstein	36,5	34,8	16,2	4,6	1,0	0,4	0,03	0,3
5974	Soest	36,7	35,0	17,1	4,1	0,9	0,4	0,03	0,4
5978	Unna	48,3	46,2	22,7	5,4	1,1	0,5	0,04	0,5
6411	Darmstadt	17,0	16,3	7,9	2,0	0,3	0,2	0,01	0,2
6412	Frankfurt am Main	73,6	70,7	32,7	10,8	1,4	0,8	0,04	0,7
6413	Offenbach am Main	12,6	12,1	5,8	1,6	0,2	0,1	0,01	0,1
6414	Wiesbaden	30,9	29,6	13,7	4,5	0,7	0,3	0,02	0,3
6431	Bergstraße	32,7	31,3	15,1	3,7	0,8	0,3	0,02	0,3
6432	Darmstadt-Dieburg	35,0	33,4	16,5	3,7	0,8	0,4	0,03	0,3
6433	Groß-Gerau	29,7	28,4	14,0	3,1	0,6	0,3	0,02	0,3
6434	Hochtaunuskreis	28,4	27,2	13,8	2,7	0,6	0,3	0,02	0,3
6435	Main-Kinzig-Kreis	49,9	47,7	23,4	5,3	1,2	0,5	0,04	0,5
6436	Main-Taunus-Kreis	27,5	26,4	13,6	2,4	0,5	0,3	0,02	0,3
6437	Odenwaldkreis	12,6	12,0	5,8	1,5	0,3	0,1	0,01	0,1
6438	Offenbach	39,9	38,3	19,5	3,7	0,8	0,4	0,03	0,4
6439	Rheingau-Taunus-Kreis	22,9	21,9	10,8	2,5	0,5	0,2	0,02	0,2
6440	Wetteraukreis	35,2	33,5	16,1	4,1	0,9	0,4	0,03	0,3
6531	Gießen	32,5	31,1	15,0	3,8	0,8	0,3	0,02	0,3
6532	Lahn-Dill-Kreis	33,1	31,5	14,8	4,1	0,9	0,3	0,03	0,3
6533	Limburg-Weilburg	22,5	21,4	10,0	3,0	0,6	0,2	0,02	0,2
6534	Marburg-Biedenkopf	29,2	27,8	13,1	3,8	0,8	0,3	0,02	0,3
6535	Vogelsbergkreis	14,3	13,6	6,1	2,2	0,4	0,1	0,01	0,1
6611	Kassel	22,8	21,9	10,3	3,0	0,4	0,3	0,01	0,2
6631	Fulda	27,4	26,1	12,8	3,0	0,7	0,3	0,02	0,3
6632	Hersfeld-Rotenburg	16,8	15,9	7,2	2,3	0,5	0,2	0,01	0,2
6633	Kassel	32,4	30,9	14,8	3,9	0,8	0,3	0,03	0,3
6634	Schwalm-Eder-Kreis	23,7	22,5	10,0	3,5	0,7	0,2	0,02	0,2
6635	Waldeck-Frankenberg	21,7	20,7	9,7	2,9	0,6	0,2	0,02	0,2
6636	Werra-Meißner-Kreis	15,1	14,4	6,2	2,5	0,5	0,1	0,01	0,1
7111	Koblenz	13,3	12,7	6,1	1,6	0,3	0,1	0,01	0,1
7131	Ahrweiler	17,2	16,3	8,0	2,0	0,5	0,2	0,02	0,2
7132	Altenkirchen (Westerwald)	18,1	17,2	8,0	2,4	0,5	0,2	0,02	0,2
7133	Bad Kreuznach	20,6	19,6	9,0	3,0	0,6	0,2	0,02	0,2
7134	Birkenfeld	12,4	11,8	5,3	1,8	0,4	0,1	0,01	0,1
7135	Cochem-Zell	9,4	8,9	4,0	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch				Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst
7137	Mayen-Koblenz	27,6	26,3	12,4	3,6	0,8	0,3	0,02	0,3
7138	Neuwied	23,4	22,3	10,6	2,9	0,6	0,2	0,02	0,2
7140	Rhein-Hunsrück-Kreis	14,0	13,3	6,3	1,8	0,4	0,1	0,01	0,1
7141	Rhein-Lahn-Kreis	17,0	16,1	7,3	2,6	0,5	0,2	0,01	0,2
7143	Westerwaldkreis	26,4	25,0	12,0	3,3	0,8	0,3	0,03	0,3
7211	Trier	12,5	12,0	5,6	1,8	0,3	0,1	0,01	0,1
7231	Bernkastel-Wittlich	15,8	15,0	6,7	2,5	0,5	0,1	0,01	0,2
7232	Bitburg-Prüm	13,4	12,7	5,9	1,8	0,4	0,1	0,01	0,1
7233	Daun	9,3	8,9	4,3	1,2	0,3	0,1	0,01	0,1
7235	Trier-Saarburg	17,9	17,0	8,1	2,3	0,5	0,2	0,02	0,2
7311	Frankenthal (Pfalz)	5,6	5,4	2,7	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
7312	Kaiserslautern	12,9	12,4	6,0	1,6	0,3	0,1	0,01	0,1
7313	Landau in der Pfalz	5,3	5,0	2,4	0,7	0,1	0,1	0,00	0,0
7314	Ludwigshafen am Rhein	18,8	18,0	8,5	2,6	0,4	0,2	0,01	0,2
7315	Mainz	23,2	22,3	11,3	2,4	0,4	0,2	0,01	0,2
7316	Neustadt an der Weinstraße	7,1	6,8	3,1	1,0	0,2	0,1	0,01	0,1
7317	Pirmasens	6,1	5,8	2,6	0,9	0,1	0,1	0,00	0,1
7318	Speyer	6,0	5,7	2,8	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
7319	Worms	10,0	9,5	4,4	1,5	0,3	0,1	0,01	0,1
7320	Zweibrücken	4,8	4,5	2,1	0,7	0,1	0,0	0,00	0,0
7331	Alzey-Worms	16,0	15,2	7,0	2,4	0,5	0,1	0,02	0,2
7332	Bad Dürkheim	18,4	17,6	8,2	2,5	0,5	0,2	0,02	0,2
7333	Donnersbergkreis	10,5	10,0	4,5	1,6	0,3	0,1	0,01	0,1
7334	Germersheim	15,5	14,8	7,3	1,7	0,4	0,2	0,01	0,1
7335	Kaiserslautern	16,4	15,5	7,4	2,1	0,5	0,2	0,02	0,2
7336	Kusel	11,2	10,7	4,6	1,9	0,4	0,1	0,01	0,1
7337	Südliche Weinstraße	14,6	13,9	6,4	2,1	0,4	0,1	0,01	0,1
7338	Ludwigshafen	20,0	19,1	9,3	2,3	0,5	0,2	0,02	0,2
7339	Mainz-Bingen	25,3	24,1	11,5	3,3	0,7	0,2	0,02	0,2
7340	Südwestpfalz	14,6	13,8	6,4	1,8	0,4	0,1	0,01	0,1
8111	Stuttgart	63,2	60,6	27,4	10,1	1,3	0,7	0,03	0,6
8115	Böblingen	43,9	42,1	22,0	3,5	0,9	0,5	0,03	0,4
8116	Esslingen	61,6	59,0	29,5	6,2	1,3	0,7	0,04	0,6
8117	Göppingen	31,7	30,2	14,5	3,8	0,8	0,3	0,02	0,3
8118	Ludwigsburg	60,9	58,4	29,7	5,9	1,2	0,7	0,05	0,6
8119	Rems-Murr-Kreis	50,0	47,9	24,1	4,9	1,1	0,5	0,04	0,5
8121	Heilbronn	13,8	13,2	6,5	1,5	0,3	0,2	0,01	0,1
8125	Heilbronn	40,9	39,0	19,7	4,1	1,0	0,4	0,04	0,4
8126	Hohenlohekreis	13,4	12,7	6,4	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch				Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst
8127	Schwäbisch Hall	23,0	22,0	10,8	2,6	0,6	0,2	0,02	0,2
8128	Main-Tauber-Kreis	17,4	16,6	7,9	2,1	0,5	0,2	0,01	0,2
8135	Heidenheim	17,0	16,2	7,8	2,0	0,4	0,2	0,01	0,2
8136	Ostalbkreis	38,9	37,1	18,3	4,0	1,0	0,4	0,03	0,4
8211	Baden-Baden	7,4	7,0	3,3	1,1	0,2	0,1	0,00	0,1
8212	Karlsruhe	31,6	30,3	14,3	4,3	0,7	0,3	0,02	0,3
8215	Karlsruhe	52,2	49,9	24,6	5,5	1,3	0,5	0,04	0,5
8216	Rastatt	27,8	26,5	13,0	3,1	0,7	0,3	0,02	0,3
8221	Heidelberg	15,5	14,8	6,8	2,3	0,3	0,2	0,01	0,1
8222	Mannheim	35,7	34,3	16,1	4,9	0,7	0,4	0,02	0,3
8225	Neckar-Odenwald-Kreis	18,9	18,0	8,8	2,0	0,5	0,2	0,02	0,2
8226	Rhein-Neckar-Kreis	66,6	63,7	31,8	6,8	1,5	0,7	0,05	0,6
8231	Pforzheim	13,2	12,7	6,4	1,4	0,2	0,1	0,01	0,1
8235	Calw	19,8	18,9	9,3	2,2	0,5	0,2	0,02	0,2
8236	Enzkreis	24,9	23,8	11,7	2,7	0,6	0,3	0,02	0,2
8237	Freudenstadt	15,2	14,5	7,0	1,9	0,4	0,2	0,01	0,1
8311	Freiburg im Breisgau	22,4	21,6	10,8	2,6	0,4	0,3	0,01	0,2
8315	Breisgau-Hochschwarzwald	29,1	27,8	14,2	3,0	0,7	0,3	0,02	0,3
8316	Emmendingen	18,4	17,6	8,7	2,1	0,4	0,2	0,02	0,2
8317	Ortenaukreis	50,1	47,8	22,9	6,4	1,3	0,5	0,04	0,5
8325	Rottweil	18,1	17,2	8,1	2,4	0,5	0,2	0,02	0,2
8326	Schwarzwald-Baar-Kreis	26,0	24,9	12,1	3,1	0,6	0,3	0,02	0,2
8327	Tuttlingen	16,6	15,8	7,6	2,1	0,4	0,2	0,01	0,2
8335	Konstanz	32,4	31,0	15,3	3,8	0,7	0,3	0,02	0,3
8336	Lörrach	26,2	25,0	12,2	3,3	0,6	0,3	0,02	0,2
8337	Waldshut	20,4	19,5	9,5	2,5	0,5	0,2	0,02	0,2
8415	Reutlingen	34,0	32,4	15,7	4,0	0,8	0,4	0,03	0,3
8416	Tübingen	25,3	24,2	12,1	2,8	0,6	0,3	0,02	0,2
8417	Zollernalbkreis	24,7	23,6	11,0	3,2	0,7	0,2	0,02	0,2
8421	Ulm	13,3	12,8	6,3	1,5	0,3	0,1	0,01	0,1
8425	Alb-Donau-Kreis	23,0	21,9	10,8	2,5	0,6	0,2	0,02	0,2
8426	Biberach	23,0	21,9	10,7	2,8	0,6	0,2	0,02	0,2
8435	Bodenseekreis	25,1	24,1	12,4	2,4	0,5	0,3	0,02	0,2
8436	Ravensburg	31,8	30,4	14,9	3,7	0,8	0,3	0,03	0,3
8437	Sigmaringen	16,4	15,6	7,5	2,0	0,4	0,2	0,02	0,2
9161	Ingolstadt	14,3	13,7	7,2	1,1	0,3	0,2	0,01	0,1
9162	München	152,3	146,7	73,6	16,7	2,3	1,7	0,08	1,4
9163	Rosenheim	7,2	6,9	3,6	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
9171	Altötting	13,6	13,0	6,5	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch			Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst	
9172	Berchtesgadener Land	12,9	12,4	6,2	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1
9173	Bad Tölz-Wolfratshausen	14,1	13,4	6,8	1,4	0,3	0,2	0,01	0,1
9174	Dachau	15,3	14,7	7,8	1,1	0,3	0,2	0,01	0,2
9175	Ebersberg	14,4	13,8	7,3	1,1	0,3	0,2	0,01	0,1
9176	Eichstätt	14,6	13,9	7,1	1,2	0,4	0,1	0,02	0,1
9177	Erding	13,5	12,9	6,6	1,3	0,3	0,1	0,01	0,1
9178	Freising	18,2	17,4	9,2	1,5	0,4	0,2	0,02	0,2
9179	Fürstenfeldbruck	24,3	23,3	12,6	1,6	0,5	0,3	0,02	0,2
9180	Garmisch-Partenkirchen	11,8	11,3	5,6	1,4	0,2	0,1	0,01	0,1
9181	Landsberg a. Lech	13,2	12,6	6,4	1,3	0,3	0,1	0,01	0,1
9182	Miesbach	11,9	11,3	5,6	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1
9183	Mühldorf a. Inn	13,5	12,9	6,5	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1
9184	München	36,6	35,2	19,2	2,4	0,6	0,4	0,03	0,4
9185	Neuburg-Schrobenhausen	11,2	10,7	5,5	1,0	0,3	0,1	0,01	0,1
9186	Pfaffenhofen a.d. Ilm	13,5	12,9	6,7	1,1	0,3	0,1	0,01	0,1
9187	Rosenheim	28,3	27,0	13,6	2,9	0,7	0,3	0,03	0,3
9188	Starnberg	15,7	15,0	7,7	1,4	0,3	0,2	0,01	0,2
9189	Traunstein	22,2	21,2	10,6	2,4	0,6	0,2	0,02	0,2
9190	Weilheim-Schongau	16,1	15,3	7,7	1,7	0,4	0,2	0,02	0,2
9261	Landshut	7,8	7,5	3,8	0,8	0,2	0,1	0,01	0,1
9262	Passau	6,4	6,2	3,1	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
9263	Straubing	5,7	5,5	2,8	0,6	0,1	0,1	0,00	0,1
9271	Deggendorf	15,1	14,3	7,1	1,6	0,4	0,2	0,01	0,1
9272	Freyung-Grafenau	11,0	10,5	5,1	1,3	0,3	0,1	0,01	0,1
9273	Kelheim	14,2	13,5	6,9	1,3	0,4	0,2	0,01	0,1
9274	Landshut	18,3	17,4	9,0	1,7	0,5	0,2	0,02	0,2
9275	Passau	24,8	23,6	11,6	2,8	0,7	0,2	0,02	0,2
9276	Regen	11,4	10,8	5,2	1,3	0,3	0,1	0,01	0,1
9277	Rottal-Inn	15,5	14,7	7,1	1,9	0,5	0,2	0,02	0,2
9278	Straubing-Bogen	12,3	11,7	5,7	1,4	0,4	0,1	0,01	0,1
9279	Dingolfing-Landau	11,3	10,7	5,2	1,3	0,3	0,1	0,01	0,1
9361	Amberg	5,4	5,2	2,5	0,6	0,1	0,1	0,00	0,1
9362	Regensburg	16,8	16,2	8,0	2,0	0,3	0,2	0,01	0,2
9363	Weiden i.d. Opf.	5,5	5,3	2,6	0,6	0,1	0,1	0,00	0,1
9371	Amberg-Sulzbach	13,4	12,8	6,3	1,4	0,4	0,1	0,01	0,1
9372	Cham	17,7	16,8	8,1	2,1	0,5	0,2	0,02	0,2
9373	Neumarkt i.d. Opf.	15,9	15,2	7,9	1,3	0,4	0,2	0,02	0,2
9374	Neustadt a.d. Waldnaab	13,1	12,4	6,0	1,5	0,4	0,1	0,01	0,1
9375	Regensburg	22,5	21,4	11,1	2,0	0,6	0,2	0,02	0,2

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch				Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst
9376	Schwandorf	18,3	17,4	8,5	1,9	0,5	0,2	0,02	0,2
9377	Tirschenreuth	10,5	9,9	4,6	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1
9461	Bamberg	8,7	8,3	3,8	1,3	0,2	0,1	0,01	0,1
9462	Bayreuth	9,0	8,7	4,3	1,0	0,2	0,1	0,01	0,1
9463	Coburg	5,7	5,4	2,5	0,8	0,1	0,1	0,00	0,1
9464	Hof	6,4	6,1	2,8	1,0	0,2	0,1	0,00	0,1
9471	Bamberg	17,8	16,9	8,5	1,8	0,5	0,2	0,02	0,2
9472	Bayreuth	14,1	13,4	6,4	1,8	0,4	0,1	0,01	0,1
9473	Coburg	11,9	11,4	5,3	1,6	0,3	0,1	0,01	0,1
9474	Forchheim	14,3	13,6	6,8	1,4	0,4	0,1	0,01	0,1
9475	Hof	15,2	14,5	6,4	2,3	0,4	0,2	0,01	0,1
9476	Kronach	10,2	9,7	4,3	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1
9477	Kulmbach	10,4	9,9	4,6	1,5	0,3	0,1	0,01	0,1
9478	Lichtenfels	9,2	8,7	4,1	1,2	0,3	0,1	0,01	0,1
9479	Wunsiedel i. Fichtelgebirge	11,8	11,2	4,9	1,9	0,3	0,1	0,01	0,1
9561	Ansbach	5,3	5,1	2,4	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
9562	Erlangen	12,4	11,9	6,1	1,1	0,2	0,1	0,01	0,1
9563	Fürth	13,3	12,7	6,0	1,8	0,3	0,1	0,01	0,1
9564	Nürnberg	57,3	55,0	26,2	7,3	1,1	0,6	0,03	0,5
9565	Schwabach	5,0	4,8	2,4	0,5	0,1	0,1	0,00	0,0
9571	Ansbach	22,7	21,5	10,2	2,9	0,7	0,2	0,02	0,2
9572	Erlangen-Höchstadt	16,5	15,7	8,3	1,3	0,4	0,2	0,02	0,2
9573	Fürth	14,4	13,8	7,2	1,2	0,3	0,2	0,01	0,1
9574	Nürnberger Land	21,2	20,3	9,9	2,3	0,5	0,2	0,02	0,2
9575	Neustadt a.d.Aisch-Bad W.	12,8	12,2	5,8	1,7	0,4	0,1	0,01	0,1
9576	Roth	15,4	14,7	7,5	1,4	0,4	0,2	0,01	0,2
9577	Weißenburg-Gunzenhausen	12,3	11,7	5,5	1,6	0,3	0,1	0,01	0,1
9661	Aschaffenburg	8,2	7,9	3,9	0,9	0,2	0,1	0,01	0,1
9662	Schweinfurt	6,4	6,1	3,0	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
9663	Würzburg	15,5	14,9	7,8	1,3	0,2	0,2	0,01	0,1
9671	Aschaffenburg	21,9	20,8	10,2	2,3	0,6	0,2	0,02	0,2
9672	Bad Kissingen	14,5	13,8	6,7	1,7	0,4	0,1	0,01	0,1
9673	Rhön-Grabfeld	11,2	10,7	5,0	1,5	0,3	0,1	0,01	0,1
9674	Haßberge	11,1	10,6	4,9	1,5	0,3	0,1	0,01	0,1
9675	Kitzingen	11,2	10,6	4,9	1,5	0,3	0,1	0,01	0,1
9676	Miltenberg	16,3	15,5	7,5	1,8	0,4	0,2	0,01	0,2
9677	Main-Spessart	17,3	16,5	7,9	2,0	0,5	0,2	0,02	0,2
9678	Schweinfurt	14,8	14,1	6,9	1,6	0,4	0,2	0,01	0,1
9679	Würzburg	21,0	20,0	9,9	2,2	0,5	0,2	0,02	0,2

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch				Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst
9761	Augsburg	31,0	29,8	14,7	3,7	0,6	0,4	0,02	0,3
9762	Kaufbeuren	5,2	5,0	2,6	0,4	0,1	0,1	0,00	0,0
9763	Kempten (Allgäu)	7,3	7,0	3,5	0,8	0,1	0,1	0,00	0,1
9764	Memmingen	5,1	4,9	2,4	0,5	0,1	0,1	0,00	0,0
9771	Aichach-Friedberg	15,7	14,9	7,9	1,2	0,4	0,2	0,02	0,2
9772	Augsburg	29,7	28,3	14,7	2,4	0,7	0,3	0,03	0,3
9773	Dillingen a.d.Donau	11,9	11,4	5,5	1,4	0,3	0,1	0,01	0,1
9774	Günzburg	15,4	14,7	7,1	1,8	0,4	0,2	0,01	0,1
9775	Neu-Ulm	20,0	19,2	9,8	1,8	0,4	0,2	0,02	0,2
9776	Lindau (Bodensee)	10,1	9,6	4,7	1,3	0,2	0,1	0,01	0,1
9777	Ostallgäu	17,2	16,4	8,1	2,0	0,5	0,2	0,02	0,2
9778	Unterallgäu	17,4	16,6	8,1	2,1	0,5	0,2	0,02	0,2
9779	Donau-Ries	16,9	16,1	7,9	1,9	0,5	0,2	0,02	0,2
9780	Oberallgäu	20,5	19,6	9,9	2,3	0,5	0,2	0,02	0,2
10041	Stadtverband Saarbrücken	46,3	44,2	19,4	7,2	1,2	0,5	0,03	0,4
10042	Merzig-Wadern	14,4	13,6	6,2	2,0	0,4	0,1	0,01	0,1
10043	Neunkirchen	20,4	19,3	8,3	3,3	0,6	0,2	0,01	0,2
10044	Saarlouis	28,5	27,1	12,4	3,7	0,8	0,3	0,02	0,3
10045	Saar-Pfalz-Kreis	21,7	20,6	9,4	2,9	0,6	0,2	0,02	0,2
10046	Sankt Wendel	12,9	12,2	5,6	1,7	0,4	0,1	0,01	0,1
11000	Berlin, Land	396,0	378,8	169,6	69,0	8,7	4,5	0,19	3,7
12051	Brandenburg an der Havel	10,0	9,5	4,3	1,8	0,2	0,1	0,01	0,1
12052	Cottbus	13,5	13,0	7,0	1,4	0,2	0,2	0,01	0,1
12053	Frankfurt (Oder)	8,2	7,9	4,2	0,9	0,1	0,1	0,00	0,1
12054	Potsdam	17,6	16,9	8,5	2,4	0,3	0,2	0,01	0,2
12060	Barnim	22,1	20,9	9,6	3,9	0,7	0,2	0,02	0,2
12061	Dahme-Spreewald	19,9	18,9	8,4	3,7	0,6	0,2	0,02	0,2
12062	Elbe-Elster	17,0	16,1	6,4	3,7	0,5	0,2	0,01	0,2
12063	Havelland	19,1	18,2	8,1	3,6	0,6	0,2	0,02	0,2
12064	Märkisch-Oderland	24,5	23,3	10,7	4,1	0,7	0,3	0,02	0,2
12065	Oberhavel	25,3	24,0	10,9	4,6	0,7	0,3	0,02	0,2
12066	Oberspreewald-Lausitz	17,0	16,2	7,2	3,0	0,4	0,2	0,01	0,2
12067	Oder-Spree	23,8	22,6	10,6	3,8	0,6	0,3	0,02	0,2
12068	Ostprignitz-Ruppin	13,9	13,2	5,6	2,8	0,4	0,1	0,01	0,1
12069	Potsdam-Mittelmark	25,2	23,8	10,2	5,1	0,8	0,3	0,02	0,2
12070	Prignitz	12,7	12,1	4,8	2,9	0,4	0,1	0,01	0,1
12071	Spree-Neiße	17,7	16,9	7,3	3,3	0,5	0,2	0,01	0,2
12072	Teltow-Fläming	20,8	19,7	8,6	4,0	0,6	0,2	0,02	0,2
12073	Uckermark	17,2	16,4	7,6	2,6	0,4	0,2	0,01	0,2

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch				Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst
13001	Greifswald, Hansestadt	6,6	6,3	3,4	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
13002	Neubrandenburg, Stadt	8,4	8,1	4,7	0,5	0,1	0,1	0,01	0,1
13003	Rostock, Hansestadt	24,0	23,1	12,0	2,7	0,4	0,3	0,01	0,2
13004	Schwerin, Landeshauptstadt	12,2	11,7	5,9	1,6	0,2	0,1	0,01	0,1
13005	Stralsund, Hansestadt	7,2	6,9	3,4	1,0	0,1	0,1	0,00	0,1
13006	Wismar, Hansestadt	5,4	5,2	2,5	0,8	0,1	0,1	0,00	0,1
13051	Bad Doberan	15,3	14,5	7,1	2,3	0,5	0,2	0,02	0,1
13052	Demmin	11,7	11,1	4,7	2,3	0,3	0,1	0,01	0,1
13053	Güstrow	13,5	12,8	5,6	2,5	0,4	0,1	0,01	0,1
13054	Ludwigslust	16,1	15,3	6,4	3,3	0,5	0,2	0,01	0,2
13055	Mecklenburg-Strelitz	10,2	9,7	4,3	1,8	0,3	0,1	0,01	0,1
13056	Müritz	9,1	8,7	4,0	1,5	0,2	0,1	0,01	0,1
13057	Nordvorpommern	14,8	14,1	6,2	2,7	0,4	0,1	0,01	0,1
13058	Nordwestmecklenburg	15,0	14,2	6,5	2,5	0,5	0,2	0,01	0,1
13059	Ostvorpommern	15,1	14,4	6,4	2,7	0,4	0,2	0,01	0,1
13060	Parchim	13,1	12,5	5,3	2,5	0,4	0,1	0,01	0,1
13061	Rügen	10,5	10,0	4,8	1,5	0,3	0,1	0,01	0,1
13062	Uecker-Randow	10,1	9,7	4,3	1,7	0,3	0,1	0,01	0,1
14161	Chemnitz, Stadt	33,7	32,2	14,6	6,0	0,8	0,4	0,02	0,3
14166	Plauen, Stadt	9,7	9,2	4,1	1,8	0,2	0,1	0,01	0,1
14167	Zwickau, Stadt	13,2	12,6	5,7	2,4	0,3	0,1	0,01	0,1
14171	Annaberg	11,2	10,6	4,1	2,7	0,4	0,1	0,01	0,1
14173	Chemnitzer Land	18,2	17,2	6,7	4,3	0,6	0,2	0,01	0,2
14177	Freiberg	18,1	17,2	7,1	3,8	0,5	0,2	0,01	0,2
14178	Vogtlandkreis	27,3	25,9	9,8	6,7	0,9	0,3	0,02	0,2
14181	Mittlerer Erzgebirgskreis	11,6	11,0	4,4	2,6	0,4	0,1	0,01	0,1
14182	Mittweida	17,7	16,8	6,4	4,3	0,6	0,2	0,01	0,2
14188	Stollberg	11,7	11,1	4,4	2,7	0,4	0,1	0,01	0,1
14191	Aue-Schwarzenberg	17,1	16,2	6,9	3,4	0,5	0,2	0,01	0,2
14193	Zwickauer Land	17,7	16,8	6,6	4,2	0,6	0,2	0,01	0,2
14262	Dresden, Stadt	61,7	59,0	26,4	11,4	1,4	0,7	0,04	0,6
14263	Görlitz, Stadt	8,4	8,0	3,4	1,7	0,2	0,1	0,00	0,1
14264	Hoyerswerda, Stadt	5,0	4,9	2,6	0,4	0,1	0,1	0,00	0,1
14272	Bautzen	19,3	18,3	7,5	4,1	0,6	0,2	0,01	0,2
14280	Meißen	18,8	17,8	6,9	4,5	0,6	0,2	0,01	0,2
14284	Niederschlesischer Oberlausitzkreis	12,4	11,8	5,2	2,2	0,3	0,1	0,01	0,1
14285	Riesa-Großenhain	14,5	13,8	5,9	2,8	0,4	0,1	0,01	0,1
14286	Löbau-Zittau	19,9	18,9	7,0	5,0	0,7	0,2	0,01	0,2
14287	Sächsische Schweiz	18,5	17,6	7,1	4,1	0,6	0,2	0,01	0,2

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
		Mineralisch			Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst	
14290	Weißeritzkreis	14,7	14,0	5,5	3,3	0,5	0,1	0,01	0,1
14292	Kamenz	18,6	17,7	7,1	4,1	0,6	0,2	0,01	0,2
14365	Leipzig, Stadt	67,3	64,1	27,1	14,1	1,8	0,8	0,04	0,6
14374	Delitzsch	15,2	14,5	6,3	2,9	0,4	0,2	0,01	0,1
14375	Döbeln	9,7	9,2	3,5	2,3	0,3	0,1	0,01	0,1
14379	Leipziger Land	18,7	17,8	7,4	3,8	0,6	0,2	0,01	0,2
14383	Muldentalkreis	16,8	15,9	6,7	3,5	0,5	0,2	0,01	0,2
14389	Torgau-Oschatz	12,5	11,9	4,9	2,6	0,4	0,1	0,01	0,1
15101	Dessau, Stadt	10,9	10,4	4,7	2,0	0,3	0,1	0,01	0,1
15151	Anhalt-Zerbst	9,5	9,0	3,6	2,1	0,3	0,1	0,01	0,1
15153	Bernburg	9,2	8,7	3,4	2,2	0,3	0,1	0,01	0,1
15154	Bitterfeld	13,6	12,9	5,4	2,8	0,4	0,1	0,01	0,1
15159	Köthen	8,7	8,2	3,2	2,0	0,3	0,1	0,01	0,1
15171	Wittenberg	16,9	16,0	6,4	3,8	0,5	0,2	0,01	0,2
15202	Halle (Saale), Stadt	31,8	30,5	14,5	5,1	0,6	0,4	0,02	0,3
15256	Burgenlandkreis	18,2	17,3	6,8	4,1	0,6	0,2	0,01	0,2
15260	Mansfelder Land	13,9	13,2	5,0	3,2	0,5	0,1	0,01	0,1
15261	Merseburg-Querfurt	16,5	15,7	6,5	3,3	0,5	0,2	0,01	0,2
15265	Saalkreis	9,0	8,5	3,5	1,9	0,3	0,1	0,01	0,1
15266	Sangerhausen	8,4	8,0	3,4	1,6	0,2	0,1	0,01	0,1
15268	Weißenfels	10,4	9,9	4,0	2,2	0,3	0,1	0,01	0,1
15303	Landeshauptstadt Magdeburg	31,2	29,9	14,3	4,9	0,6	0,4	0,02	0,3
15352	Aschersleben-Staßfurt	13,1	12,5	4,9	3,0	0,4	0,1	0,01	0,1
15355	Bördekreis	10,3	9,8	3,8	2,4	0,4	0,1	0,01	0,1
15357	Halberstadt	10,1	9,6	3,9	2,2	0,3	0,1	0,01	0,1
15358	Jerichower Land	13,0	12,3	5,3	2,6	0,4	0,1	0,01	0,1
15362	Ohrekreis	15,0	14,2	6,1	3,0	0,5	0,1	0,01	0,1
15363	Stendal	17,8	16,9	7,1	3,7	0,5	0,2	0,01	0,2
15364	Quedlinburg	10,0	9,5	3,8	2,3	0,3	0,1	0,01	0,1
15367	Schönebeck	9,9	9,4	3,9	2,1	0,3	0,1	0,01	0,1
15369	Wernigerode	12,1	11,5	4,6	2,7	0,4	0,1	0,01	0,1
15370	Altmarkkreis Salzwedel	12,8	12,1	4,9	2,8	0,4	0,1	0,01	0,1
16056	Eisenach, Stadt	5,5	5,2	2,2	1,1	0,1	0,1	0,00	0,1
16051	Erfurt, Stadt	24,8	23,8	11,4	3,9	0,5	0,3	0,02	0,2
16052	Gera, Stadt	14,1	13,5	6,6	2,1	0,3	0,2	0,01	0,1
16053	Jena, Stadt	11,9	11,4	5,5	1,9	0,2	0,1	0,01	0,1
16054	Suhl, Stadt	5,5	5,3	2,7	0,7	0,1	0,1	0,00	0,1
16055	Weimar, Stadt	7,7	7,4	3,3	1,5	0,2	0,1	0,00	0,1
16061	Eichsfeld	13,0	12,4	5,4	2,4	0,4	0,1	0,01	0,1

Allgemeine Gemeinde- kennziffer	Kreisname	Baustofflager Wohnen, Masse in Mio. Mg							
		Gesamt							
			Mineralisch			Holz	Metall	Kunst- stoff	Sonst
16062	Nordhausen	12,0	11,4	4,8	2,4	0,3	0,1	0,01	0,1
16063	Wartburgkreis	18,1	17,2	7,2	3,5	0,6	0,2	0,01	0,2
16064	Unstrut-Hainich-Kreis	14,8	14,0	5,6	3,2	0,5	0,1	0,01	0,1
16065	Kyffhäuserkreis	11,9	11,3	4,6	2,5	0,4	0,1	0,01	0,1
16066	Schmalkaden-Meiningen	18,7	17,8	7,1	4,1	0,6	0,2	0,01	0,2
16067	Gotha	18,9	17,9	7,3	4,0	0,6	0,2	0,01	0,2
16068	Sömmerda	10,1	9,6	3,9	2,1	0,3	0,1	0,01	0,1
16069	Hildburghausen	9,2	8,7	3,4	2,1	0,3	0,1	0,01	0,1
16070	Ilm-Kreis	15,7	14,9	6,2	3,3	0,5	0,1	0,01	0,1
16071	Weimarer Land	11,3	10,7	4,4	2,4	0,4	0,1	0,01	0,1
16072	Sonneberg	8,9	8,5	3,2	2,1	0,3	0,1	0,01	0,1
16073	Saalfeld-Rudolstadt	16,3	15,5	6,1	3,6	0,5	0,2	0,01	0,2
16074	Saale-Holzland-Kreis	11,6	11,0	4,5	2,4	0,4	0,1	0,01	0,1
16075	Saale-Orla-Kreis	12,7	12,0	4,6	3,0	0,4	0,1	0,01	0,1
16076	Greiz	16,2	15,3	5,9	3,8	0,5	0,1	0,01	0,1
16077	Altenburger Land	14,9	14,1	5,7	3,3	0,4	0,1	0,01	0,1
*) eigene Nummer									

Anlage 5: Differenzierte Annahmen zur Beschreibung der Anteile tragenden und nicht tragender Elemente in Gewerbebauten

Nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse einer durchgeführten Literatursichtung sowie einer im Rahmen eines IÖR-Baufachexpertenworkshops vorgenommenen Einschätzung von Kennwertbandbreiten zu den Anteilen der tragenden Konstruktion am Gesamtkonstruktionsvolumen zusammen (s. hierzu Ausführungen in Abschnitt 3.3.3)

Tabelle A-5-1: Typische Konstruktionsweisen und ihre Differenzierung der tragenden und nicht tragenden Elemente

Gebäudearten	Konstruktionsweise	Beschreibung und Einschätzung der tragenden Elemente	Beschreibung und Einschätzung der nicht tragenden Elemente
Anstaltsgebäude	Massivbau	Ziegel und sonst. Mauersteine, Stahlbeton	Putze, Dämmschichten, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		85 ... 95 %	5 ... 15 %
Büro- und Verwaltungsgebäude	Massivbau	Ziegel und sonst. Mauersteine, Stahlbeton	Putze, Dämmschichten, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		85 ... 95 %	5 ... 15 %
	Stahlbetonbau	Stahlbeton, (Verschiedenartige Stütze-Riegel-Konstruktionen)	Putze, Dämmschichten, Ziegel und sonst. Mauersteine, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		75 ... 85 %	15 ... 25 %
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	Massivbau	Ziegel und sonst. Mauersteine, Stahlbeton	Putze, Dämmschichten, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		85 ... 95 %	5 ... 15 %
	Holzbau	Verschiedenartige Holzstützen und Holzbinder sowie Holztragwerkskonstruktionen	Dämmschichten, Verschiedenartige Fassadenelemente, Einfache Verkleidungen
		65 ... 75 %	25 ... 35 %
	Stahlbau	Verschiedenartige Stahlstützen und Stahlbinder sowie Stahltragwerkskonstruktionen	Putze Dämmschichten Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		2 ... 8 %	92 ... 98 %
Stahlbetonbau	Stahlbeton, (Verschiedenartige Stütze-Riegel-Konstruktionen)	Putze, Dämmschichten, Ziegel und sonst. Mauersteine, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen	
		75 ... 85 %	15 ... 25 %

Gebäudearten	Konstruktionsweise	Beschreibung und Einschätzung der tragenden Elemente	Beschreibung und Einschätzung der nicht tragenden Elemente
Fabrik- und Werkstattgebäude	Stahlbau	Verschiedenartige Stahlstützen und Stahlbinder sowie Stahltragwerkskonstruktionen	Putze, Dämmschichten, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		2 ... 8 %	92 ... 98 %
	Stahlbetonbau	Stahlbeton, (Verschiedenartige Stütze-Riegel-Konstruktionen)	Putze, Dämmschichten, Ziegel und sonst. Mauersteine Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		75 ... 85 %	15 ... 25 %
	Massivbau	Ziegel und sonst. Mauersteine, Stahlbeton	Putze, Dämmschichten, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		85 ... 95 %	5 ... 15 %
Handels- und Lagergebäude	Stahlbau	Verschiedenartige Stahlstützen und Stahlbinder sowie Stahltragwerkskonstruktionen	Putze, Dämmschichten, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		2 ... 8 %	92 ... 98 %
	Stahlbetonbau	Stahlbeton, (Verschiedenartige Stütze-Riegel-Konstruktionen)	Putze, Dämmschichten, Ziegel und sonst. Mauersteine, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		75 ... 85 %	15 ... 25 %
	Massivbau	Ziegel und sonst. Mauersteine, Stahlbeton	Putze, Dämmschichten, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		85 ... 95 %	5 ... 15 %
Hotels und Gaststätten	Massivbau	Ziegel und sonst. Mauersteine, Stahlbeton	Putze, Dämmschichten Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		85 ... 95 %	5 ... 15 %
	Stahlbetonbau	Stahlbeton, (Verschiedenartige Stütze-Riegel-Konstruktionen)	Putze, Dämmschichten, Ziegel und sonst. Mauersteine, Verschiedenartige Fassadenelemente und Wandverkleidungen
		75 ... 85 %	15 ... 25 %

Anlage 6: Spezifizierung der Modellannahmen zur Gebäudebestandsentwicklung

Tabelle A-6-1: Projektion des Wohnungszugangs und Wohnungsabgangs für 2020 nach EZFH und MFH auf die Raumtypen

Art der Bestandsveränderung	Wohnungen /Jahr											
	Westdeutschland und Berlin						Ostdeutschland (ohne Berlin)					
	Raumtyp 1		Raumtyp 2		Raumtyp 3		Raumtyp 4		Raumtyp 5		Raumtyp 6	
	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH
Zugang durch Neubau	18.983	31.991	14.312	11.155	69.767	41.137	1.517	1.138	8.615	697	4.284	709
Abgang	4.090	18.533	3.884	6.017	17.327	13.349	223	10.836	2.546	32.655	230	3.509

Tabelle A-6-2: Modifizierte Annahmen zur Bautätigkeit im Jahr 2020 in den Bestandsentwicklungsvarianten V1 und V2 nach EZFH und MFH und nach Raumtypen in der Gegenüberstellung zur Basisvariante

	Westdeutschland und Berlin						Ostdeutschland (ohne Berlin)					
	Raumtyp 1		Raumtyp 2		Raumtyp 3		Raumtyp 4		Raumtyp 5		Raumtyp 6	
	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH	EZFH	MFH
Wohnungszugang in V1 (Wo/Jahr)	15.182	42.714	11.446	14.893	55.797	54.925	2.269	849	12.888	520	6.408	529
Abweichung Zugang in V1 zur entsprechenden Annahme der Basisvariante (%)	-20,0 %	33,5 %	-20,0 %	33,5 %	-20,0 %	33,5 %	49,6 %	-25,4 %	49,6 %	-25,4 %	49,6 %	-25,4 %
Wohnungsabgang in V2 (Wo/Jahr)	924	4.422	877	1.436	3.913	3.185	114	8.266	1.299	24.910	118	2.677
Abweichung Abgang in V2 zur entsprechenden Annahme der Basisvariante (%)	-77,4 %	-76,1 %	-77,4 %	-76,1 %	-77,4 %	-76,1 %	-49,0 %	-23,7 %	-49,0 %	-23,7 %	-49,0 %	-23,7 %

Anlage 7: Ergänzende Daten zu den Berechnungen aus Kapitel 6

Tabelle A-7-1: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau nach Herkunft in 2020 (siehe Abbildung 6-1)

	AL-Zugang	AL-Abgang	NL-Zugang	NL-Abgang	D-Zugang	D-Abgang
Masse in Mio. Mg/a	37,7	16,2	4,4	7,5	42,1	23,7

Tabelle A-7-2: Anteile von Wohnen und Gewerbe am Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2020 (siehe Abbildung 6-2)

Verhältnis in %	AL-Zugang	AL-Abgang	NL-Zugang	NL-Abgang	D-Zugang	D-Abgang
Wohnen	72,3 %	56,8 %	61,6 %	84,9 %	71,2 %	65,6 %
Gewerbe	27,7 %	43,2 %	38,4 %	15,1 %	28,8 %	34,4 %

Tabelle A-7-3: Anteile von Betonen und Ziegel am Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in 2020 (siehe Abbildung 6-3)

Verhältnis in %	AL-Zugang	AL-Abgang	NL-Zugang	NL-Abgang	D-Zugang	D-Abgang
Beton	100,0 %	72,0 %	100,0 %	71,9 %	100,0 %	72,0 %
Ziegel	-	28,0 %	-	28,1 %	-	28,0 %

Tabelle A-7-4: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau in den Raumtypen (siehe Abbildung 6-4)

	Raumtypen	Masse in Mio. Mg/a	
		Zugang	Abgang (B+Z)
1	vorwiegend Kernstaedte der AL	10,0	4,9
2	ländl Kreise mit geringer Dynamik in AL	5,6	2,7
3	Suburbane Kreise und ländl Kreise mit größerer Dynamik in AL	22,1	8,6
4	vorwiegend Kernstaedte der NL	0,7	1,6
5	dünn besiedelte und häufig periphere Räume in NL	2,7	5,3
6	Umlandkreise von Berlin und Kernstäedten der NL mit Suburbanisierungstendenzen	1,0	0,6

Tabelle A-7-5: Zu- und Abgang recyclingrelevanter Baustoffe aus Bautätigkeit im Hochbau nach Herkunft in 2050 (siehe Abbildung 6-6)

	AL-Zugang	AL-Abgang	NL-Zugang	NL-Abgang	D-Zugang	D-Abgang
Masse in Mio. Mg/a	21,6	36,1	3,0	7,2	24,6	43,3

Tabelle A-7-6: Baustoffabgang, erfasste Menge und aufbereitete Menge an RC-Gesteinskörnungen in Deutschland 2020 (siehe Abbildung 6-7)

	Abgang von Betonen und Ziegeln	Erfasste Menge von Betonen und Ziegeln	aufbereitete Menge an Betonen und Ziegeln für RC GK
Masse in Mio. Mg/a	23,68	18,95	11,37

Tabelle A-7-7: Potenzielles Angebot an RC-GK (aufbereitete Menge an RC-GK) nach Erfassung und Aufbereitung (siehe Abbildung 6-8)

Masse in Mio. Mg/a	AL		NL		D	
	2020	2050	2020	2050	2020	2050
RC-Betone	5,6	13,5	2,6	2,5	8,2	16,0
RC-Ziegel	2,2	3,8	1,0	1,0	3,2	4,8

Tabelle A-7-8: Potenzielle Nutzmengen an Betonen, Gesteinskörnungen und daraus abgeleitete Menge an einsetzbaren RC-GK für unterschiedliche Liefertypen am Beispiel von Deutschland 2020 (angegebene Werte sind Jahreswerte) (siehe Abbildung 6-9)

Inputmenge in den Gebäudebestand (Mio. m³)		Betone	darin GK	
		17,5	12,6	
substituierbares Volumen an GK (Mio. m³)		L*	LT1	LT2
		5,7	5,7	4,4
Potenzielle Nutzmenge an RC-GK (Mio. Mg)	Beton RC-GK	13,2	11,5	6,6
	Ziegel RC-GK	-	1,3	2,8

Tabelle A-7-9: Potenzielle Nutzmenge an RC-GK 2020 in Abhängigkeit des Liefertyps nach Raumtypen

Potenzielle Nutzmenge (1000 Mg)		D	AL-ges.	AL nach Raumtypen			NL-ges.	NL nach Raumtypen		
				1	2	3		4	5	6
L* (zulässiger RC-Anteil 45 %, 100 % Beton RC)	RC-Betone	13.170	11.797	3.118	1.766	6.913	1.374	210	836	327
	RC-Ziegel	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RC-GK ges.	13.170	11.797	3.118	1.766	6.913	1.374	210	836	327
L1 (zulässiger RC-Anteil 45 %, 90 % Beton RC, 10 % Ziegel-RC)	RC-Betone	11.541	10.338	2.732	1.548	6.058	1.204	184	732	287
	RC-Ziegel	1.283	1.149	304	172	673	134	20	81	32
	RC-GK ges.	12.824	11.487	3.036	1.720	6.731	1.337	205	814	319
L2 (zulässiger RC-Anteil 35 %, 70 % Beton RC, 30 % Ziegel-RC)	RC-Betone	6.636	5.944	1.571	890	3.483	692	106	421	165
	RC-Ziegel	2.843	2.547	673	381	1.493	297	45	180	71
	RC-GK ges.	9.480	8.491	2.244	1.271	4.976	989	151	602	236

Tabelle A 7-10: Potenzielle Nutzmenge an RC-GK in 2050 in Abhängigkeit des Liefertyps

		Potenzielle Nutzmenge (1000 Mg)		
		D	AL-ges.	NL-ges.
L* zulässiger RC-Anteil 45 %, 100 % Beton RC	RC-Betone	7.712	6.764	948
	RC-Ziegel	0	0	0
	RC-GK ges.	7.712	6.764	948
L1 zulässiger RC-Anteil 45 %, 90 % Beton RC, 10 % Ziegel-RC	RC-Betone	6.758	5.927	831
	RC-Ziegel	751	659	92
	RC-GK ges.	7.509	6.586	923
L2 zulässiger RC-Anteil 35 %, 70 % Beton RC, 30 % Ziegel-RC	RC-Betone	3.886	3.408	478
	RC-Ziegel	1.665	1.460	205
	RC-GK ges.	5.551	4.869	682

Tabelle A-7-11: Potenzieller Nutzmenge an RC-GK und relevantes RC-Angebot unter Annahme von L* für 2020 (siehe Abbildung 6-10)

Masse in 1000 Mg/a	Raumtypen					
	1	2	3	4	5	6
Pot. Nutzmenge RC-Beton	3.118	1.766	6.913	210	836	327
Pot. Angebot RC- Beton	1.666	908	3.027	542	1.810	229

Tabelle A-7-12: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials unter Annahme von L* für 2020 (siehe Abbildung 6-11)

Masse in Mio. m ³ /a	Raumtypen					
	1	2	3	4	5	6
max. Substitutionspotenzial	1,34	0,76	2,98	0,09	0,36	0,14
RESPOT bei L*	0,72	0,39	1,30	0,09	0,36	0,10

Tabelle A-7-13: RESPOT unter Annahme von L* im Jahr 2020 nach Raumtypen, vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials (indiziert Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %) (siehe Abbildung 6-12)

Anteil in %	Raumtypen					
	1	2	3	4	5	6
RESPOT bei L*	53 %	51 %	44 %	100 %	100 %	70 %

Tabelle A-7-14: Regionalisierte RC-GK Mangel und Überschussprofile unter der Annahme von L* für 2020 (siehe Abbildung 6-13)

Volumen in Mio. m ³ /a	Raumtypen					
	1	2	3	4	5	6
Mangel an RC-GK	-0,63	-0,37	-1,67	0,00	0,00	-0,04
Lager an RC-GK_Ziegel	0,37	0,22	0,60	0,12	0,39	0,04
Lager an RC-GK_Betone	0,00	0,00	0,00	0,14	0,42	0,00

Tabelle A-7-15: Potenzieller Nutzmenge an RC-GK und relevantes RC-Angebot bei optimiertem Liefertyp für 2020 (siehe Abbildung 6-14)

Masse in 1000 Mg/a	Raumtypen					
	1	2	3	4	5	6
Pot. Nutzmenge RCZiegel	673	381	1.493	0	0	32
Pot. Nutzmenge RCBeton	1.571	890	3.483	210	836	287
Pot. Angebot RCZiegel	680	394	1.100	212	718	81
Pot. Angebot RCBeton	1.666	908	3.027	542	1.810	229

Tabelle A-7-16: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials bei optimiertem Liefertyp für 2020 (indiziert Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %) (siehe Abbildung 6-15)

Anteil in %	Raumtypen					
	1	2	3	4	5	6
RESPOT bei L-optimiert	78 %	78 %	57 %	100 %	100 %	80 %

Tabelle A-7-17: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials bei optimiertem Liefertyp und Erhöhung der Erfassungsquote von 80 % auf 90 % für 2020 (indiziert Darstellung – Index max. Substitutionspotenzial = 100 %) (siehe Abbildung 6-16)

Anteil in %	Raumtypen					
	1	2	3	4	5	6
RESPOT bei L-optimiert 90 %	78 %	78 %	64 %	100 %	100 %	90 %

Tabelle A-7-18: Auswirkungen der veränderter Annahmen zum Baugeschehen auf das RESPOT (indizierte Darstellung) (siehe Abbildung 6-18)

Anteil in %	Raumtypen					
	1	2	3	4	5	6
RESPOT Referenz	78 %	78 %	65 %	100 %	100 %	90 %
RESPOT V1	78 %	78 %	67 %	100 %	100 %	76 %
RESPOT V2	47 %	49 %	39 %	100 %	100 %	78 %

Tabelle A-7-19: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials bei optimiertem Liefertyp (L*) und Erhöhung der Erfassungsquote von 80 % auf 90 % für 2020 in der Unterscheidung Ost/West (siehe Abbildung 6-19)

Volumen in Mio. m³/a	Westdeutschland	Ostdeutschland	Deutschland
max. Substitutionspotenzial	5,1	0,6	5,7
RESPOT bei L-opt	3,6	0,6	4,1

Tabelle A-7-20: RESPOT und vor dem Hintergrund des max. Substitutionspotenzials unter Annahme von Liefertyp L* in 2050 in der Unterscheidung Ost/West (siehe Abbildung 6-19)

Volumen in Mio. m³/a	Westdeutschland	Ostdeutschland	Deutschland
max. Substitutionspotenzial	2,9	0,4	3,3
RESPOT bei L*	2,9	0,4	3,3

Anlage 8: Stoffkennwerte für den Einzelbaustoff Kupfer – ein Exkurs.

Das Vorhaben zielt auf die Ermittlung des Potenzials der möglichst hochwertigen Verwertung von Bauabfällen. Der Hauptfokus liegt damit auf Zu- und -abgängen von Betonen und Ziegel. Diese Baustoffe sind mit dem verfolgten Ansatz der Stoffkennwertbildung unter Beachtung der Baustoffe des Rohbaus adäquat erfasst. Aus Ressourcenschonungssicht sind über dieses Vorhaben hinaus weitere Baustoffe von Interesse. Dies betrifft insbesondere das Metall Kupfer, hinsichtlich dessen in der aktuellen Diskussion erhöhter Informationsbedarf besteht.

Im vorliegenden Abschnitt werden am Beispiel Kupfer Möglichkeiten der Erweiterung der vorliegenden Methodik auf andere Stoffbereiche aufgezeigt, die in der vorliegenden Kennzahlenbildung keine Berücksichtigung finden. Dies betrifft Baustoffe des Ausbaus (Haustechnik, Elektroinstallation, etc.), die mit dem Rohbau nicht erfasst sind. Hierzu werden Daten recherchiert, entlang derer eine grobe Einschätzung des spezifischen Kupferlagers in Gebäuden erfolgen kann. Hier können allerdings nur sehr grobe Trends aufgezeigt werden. Tiefergehende Analysen in diesem Themenfeld sind mit der vorgenommenen Ausrichtung des Vorhabens nicht vorgesehen. Hier muss auf weiterführende Literatur verwiesen werden, auf die nachfolgend Bezug genommen wird.

Zwei vorliegende Dissertationen geben Hinweise auf spezifische Stoffkennwerte im Gebäudebestand. Sie behandeln das Thema Kupfer im Gebäudebestand jedoch mit deutlich abweichender Intensität. Während sich Wittmer (2006) intensiv mit dem Kupferlager im Gebäudebestand auseinandersetzt, wird dieses Themenfeld von Schäfer (2004) nur gestreift. Eigene Analysen werden von ihm nicht angestellt.

Schäfer (2004: 38ff.) bezieht sich auf Untersuchungen von Satlow et al. (2002) und übernimmt daraus Angaben zum spezifischen Kupfergehalt im Wohnungsbau. Dabei differenziert er nach Installationsarten, nimmt jedoch keine Unterscheidung nach Gebäudearten vor. Vielmehr weist er Bandbreiten möglicher Ausprägungen der Werte aus und bildet damit Wertebereiche (Tabelle A-8-1).

Tabelle A-8-1: Spezifische Kupfergehalte in Anwendungen des Bauwesens (Quelle Schäfer 2004: 38 unter Verwendung von Angaben aus Satlow et al. 2002)

Anwendung	spez. Kupfergehalt [Kg/m ²] ⁶⁹	
	Min	max
Trinkwasser	0,15	0,69
Gas-Installation	0,1	0,36
Heizungsinstallation	0,14	0,34
Stromversorgung	0,2	0,8
Gesamt	0,59	2,19

Die Spannweite der in Tabelle A-8-1 dargestellten Werte deckt einen sehr weiten Bereich ab. So liegt der angegebene spezifische maximale spezifische Kupfergehalt im Wohnungsbau

⁶⁹ In Schäfer wird die Bezugsfläche nicht weiter spezifiziert. In der von ihm genannten Quelle, auf die er sich bezieht wird dagegen angedeutet, dass es sich dabei um Wohnfläche handelt.

um nahezu Faktor 4 über dem Minimalwert⁷⁰. Dies deutet bereits die hohe Unsicherheit an, die mögliche Hochrechnungen unter Verwendung wenig ausdifferenzierter Kennwerte aufweisen.

Wittmer (2004) fokussiert seine Untersuchungen dagegen auf Kupferlagerstätten in Bauwerksbeständen. Er führt dazu umfangreich empirische Analysen durch und kombiniert dazu unterschiedliche Erhebungsmethoden, die von Auswertungen von Primärdaten über Expertenbefragungen bis hin zu Literaturanalysen reichen. Räumlich fokussiert er auf einen regionalen Ausschnitt des Schweizer Gebäudebestandes. Der dabei verwendete Ansatz liegt dem in dieser Studie verwendeten Ansatz sehr nahe. So beruft sich Wittmer (2006) auf eine von Lichtenberger (2005) beschriebene Methode der Beschreibung synthetischer Gebäude, deren Zusammensetzung Flächen- und Stoffverhältnisse definierter Gebäudebestände widerspiegeln, die sie als deren typische Vertreter stellvertretend abbilden⁷¹. Eine tiefergreifende Auseinandersetzung mit den Erkenntnissen aus Wittmer (2004) ist im Rahmen dieser Arbeit nicht zu leisten. Diesbezüglich wird auf die vorliegende Arbeit verwiesen. Möglich ist aber, aus einer von Wittmer (2006) vorgenommene Hochrechnung zum Kupferlager für einen regionalen Ausschnitt der Schweiz spezifische Kennzahlen für die verwendeten „ARK-Häuser“ zu isolieren, und diese den Werten aus Schäfer (2004) bzw. Satlow et al. 2002 gegenüberzustellen.

So nimmt Wittmer (2006) Hochrechnungen zum Kupferlager in Gebäuden der oben erwähnten Schweizer Beispielregion an. Dabei unterscheidet er im Wohnbereich Ein- von Mehrfamilienhäusern. Im Nichtwohnbereich unterscheidet er die Gebäudearten Dienstleistungsgebäude (DLG) und Produktionsgebäude (PRG). Das Kupferlager des betrachteten Ausschnitts ist in Tabelle A-8-2 aufgetragen. Zusätzlich werden Flächenangaben zum Gebäudebestand gemacht, auf den sich diese Hochrechnungen beziehen.

Um die Werte für Wohngebäude aus Wittmer (2006) mit den aus Schäfer (2004) zu vergleichen, werden auf Grundlage der Angaben aus Tabelle A-8-2 spezifische wohnflächenbezogene Kennwerte gebildet. Dazu wird in Anlehnung an Korda (1999:117) die Bruttogeschossfläche unter Verwendung des Faktors 0,8 überschlägig in Wohnfläche umgerechnet. Die Zusammenfassung der kumulierten spezifischen Kennwerte aus Schäfer (2004) und der unter Verwendung der in Tabelle A-8-2 angegebenen Daten berechneten Werte nach Wittmer (2006) zeigt Tabelle A-8-3.

⁷⁰ Über die Methode der Kennwertbildung ist aus den zitierten Quellen nur wenig zu entnehmen. Sie bleibt weitestgehend im dunkeln. Aufgrund der zitierten Quellen ist zu vermuten, dass Kennwerte aus unterschiedlichen Sekundärquellen zusammengetragen wurden bzw. daraus abgeleitet wurden.

⁷¹ Eine vergleichbare Methode wird von Buchert et al. 1998 und 2004 bei der Formulierung der Archetypen im Wohnungsbau angewendet, die Grundlage der Kennwertbildung für den Bereich Wohnen im Rahmen dieser Arbeit sind. Ebenso erfolgt die Kennwertbildung Gewerbebauten im Rahmen dieser Arbeit anhand synthetischer Gebäude.

Tabelle A-8-2: Regionales Kupferlager einer Schweizer Beispielregion (Quelle: Wittmer 2006: 76f.)

Funktionsbereich	Kupferlager in Tonnen (gerundet auf 1000 t) nach Gebäudetypen			
	EFH	MFH	DLG	PRG
Bedachung	6.000	9.000	8.000	-
Dachentwässerung	28.000	44.000	24.000	34.000
Dachgauben	18.000	30.000	6.000	-
Blitzableiter	4.000	3.000	4.000	13.000
Stromanlagen	24.000	43.000	64.000	40.000
Telekommunikation	2.000	2.000	3.000	60
Sanitäranlagen	17.000	31.000	10.000	6.000
Heizungsanlagen	40.000	42.000	13.000	600
Gebäude gesamt	139.000	204.000	132.000	93.000
Bruttogeschossfläche (10 ⁶ m ²)	189	414	207	260

Tabelle A-8-3: Spezifische Stoffkennwerte für Kupfer nach Gebäudetyp (entnommen aus Schäfer 2004: 38/Satlow et al. 2002 bzw. berechnet unter Verwendung von Daten aus Wittmer 2006: 76f.)

Bereich / Gebäudeart		nach Schäfer (2004)	nach Wittmer (2006) ¹⁾
Wohnungsbau (kg/m ² Wohnfläche)	Einfamilienhaus	Keine Werte	0,92
	Mehrfamilienhaus		0,62
	Wohngebäude gesamt	min: 0,59; max: 2,19	0,79
Nichtwohnungsbau (kg/m ² Bruttogeschossfläche)	Dienstleistungsgebäude	Keine Werte	0,64
	Produktionsgebäude		0,36

Eine Gegenüberstellung der Werte der beiden herangezogenen Quellen ist nur für „Wohngebäude gesamt“ möglich. Hier zeigt sich, dass die aus Wittmer (2006) geschätzten Werte zwar innerhalb des von Schäfer 2004/Satlow et al. 2002 angegebenen Wertebereichs liegen, allerdings nahe am dort angegebenen Minimalwert angesiedelt sind. Dies gilt für den auf Basis von Wittmer (2006) berechneten Summenwert für Wohngebäude, aber auch für die nach EFH und MFH differenzierten Einzelwerte. Zu erwarten wäre dagegen eher gewesen, dass die auf Wittmer (2006) basierenden Werte verglichen mit den Werten der Vergleichsstudie überdurchschnittlich sind, da letztere weniger Gewerke bzw. Bauteile mit in Betracht ziehen (s. Tabelle A-8-1 und Tabelle A-8-3). Zu vermuten ist, dass die Unterschiede methodischer Natur sind. Während sich die in Schäfer 2004/Satlow et al. 2002 angegebenen Werte vermutlich auf einzelne Gebäudevertreter beziehen (s. hierzu Fußnote 70), die Extremausprägungen an Kupfergehalten aufweisen können, stellen die Werte aus Wittmer (2006) Mittelwerte größerer Gebäudebestände dar. Ungeachtet möglicher regionaler Besonderheiten des von Wittmer (2006) betrachteten Gebäudebestandes wird angenommen, dass die von ihm genannten Werte aufgrund der von ihm verwendeten Methodik das Kupferlager im Gebäudebestand besser adaptiert.

Basierend auf den Kenngrößen, die in Anlehnung an Wittmer (2006) berechnet wurden, erfolgte im Rahmen dieses Exkurses eine Schätzung des Kupferlagers im Wohngebäudebe-

stand⁷² Deutschlands sowie eine überschlägige Berechnung von Kupferzu- und Abflüssen infolge der laufenden Bestandsveränderungen im Gesamtgebäudebestand (Wohnen und Gewerbe). Die Angaben zum Kupferlager im Bestand beziehen sich auf den Gebäudebestand 2005. Die Zu- und Abflüsse wurden beispielhaft unter Verwendung der Bestandsveränderungsdaten im Jahr 2020 berechnet. Dabei wurden die in Abschnitt 6.1 angenommen Zugänge und Abgänge der Basisvariante berücksichtigt.

Um die in Tabelle A-8-3 genannten Stoffkennwerte auf das Mengengerüst des Wohnungsbestandes sowie der Gebäudebestandsveränderungen anwenden zu können, mussten diese zunächst auf die im Stoffstrommodell verwendeten Bezugsgrößen umgerechnet werden. Für Wohnen wird im Stoffstrommodell als Bezugsgröße „Wohnungen“ verwendet, die Modellrechnungen im Gewerbe beziehen sich auf Gebäude. Die Umrechnung der wohnflächenbezogenen Kenngrößen für Wohngebäude auf wohnungsbezogene Kenngrößen erfolgt überschlägig unter Beachtung der in Tabelle A-8-4 angegebenen mittleren Wohnungsgrößen, die aktuellen Bestandsdaten der Bautätigkeitsstatistik entnommen sind. Die Umrechnung der auf Bruttogeschossfläche bezogenen Kenngrößen auf Gebäude erfolgt unter Beachtung mittlerer gebäudebezogener Angaben zur Bruttogeschossfläche. Dies können in der Unterscheidung nach der betrachteten Gebäudearten aus Angaben zur Nutzfläche der Bautätigkeitsstatistik sowie Flächenanalysen von Gruhler und Böhm (2008) unter Verwendung von Daten des Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI) geschätzt werden (Tabelle A-8-5). Die Zuordnung der in Tabelle A-8-5 genannten Gebäudearten zu den von Wittmer (2006) unterschiedenen Typen von Nichtwohngebäuden erfolgt entlang der in Tabelle A-8-6 vorgenommenen Einordnung.

Tabelle A-8-4: Mittlere Wohnungsgröße im Wohnungsbestand nach EZFH und MFH (eigene Berechnung auf Grundlage von 2007, Bezugsjahr 2005)

Gebäudeart	Mittlere Wohnungsgröße
Ein- und Zweifamilienhaus	107,08 m ² /Wohnung
Mehrfamilienhaus	68,52 m ² /Wohnung

Tabelle A-8-5: Mittlere Bruttogeschossfläche je Gebäude nach Gebäudeart (eigene Berechnung auf Grundlage von Angaben zur Nutzflächen der Bautätigkeitstatistik und Ergebnisse aus BKI-Flächenanalysen von Gruhler und Böhm 2008)

Gebäudeart	Bruttogeschossfläche /Gebäude
Anstaltsgebäude	3877,0
Büro- und Verwaltungsgebäude	2499,7
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	520,2
Fabrik- und Werkstättengebäude	1530,9
Handels- und Lagergebäude	1515,4
Hotels und Gaststätten	1427,3

⁷² Für Gewerbegebäude stehen keine Bestandsdaten zur Verfügung

Tabelle A-8-6: Angenommene Zuordnung der Gewerbegebäudetypen aus Wittmer (2006) zu den verwendeten Gebäudearten des Stoffstrommodells

Im Stoffstrommodell unterschiedene Gewerbegebäudearten	Gebäudeart nach Wittmer (2006)
Anstaltsgebäude	Dienstleistungsgebäude
Büro- und Verwaltungsgebäude	
Hotels und Gaststätten	
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude	Produktionsgebäude
Fabrik- und Werkstattegebäude	
Handels- und Lagergebäude	

Das Ergebnis der vorgenommenen Hochrechnung mit den genannten Grundlagen ist in Tabelle A-8--7 zusammengefasst. Aus der nachfolgenden Abbildung A-8-1 erfolgt eine weitere Differenzierung der Werte nach den verwendeten Hauptgebäudearten nach Wittmer (2006). Die Werte beziehen sich auf Deutschland gesamt. Regionaldifferenzierte Hochrechnungen sind mit dem Stoffstrommodell grundsätzlich möglich. Hierauf wird im Rahmen dieses Exkurses jedoch verzichtet, da Stoffkreisläufe beim Baustoff Kupfer, anders als beim mineralischen Baustoffen, keinen regionalen Begrenzungen unterliegen.

Die Berechnungen weisen deutlich höhere durch Neubau induzierte Inputströme auf, als durch Gebäudeabriss freigesetzt werden. Die Bereiche Wohnen und Gewerbe halten sich beim Input, näherungsweise auch beim Output in etwa die Waage. Wichtig ist jedoch darauf hinzuweisen, dass hier nur Massenströme betrachtet werden, die durch Abgang und Zugang von Gebäuden induziert werden. Der Frage, welche Stoffflüsse darüber im Rahmen von Baumaßnahmen im Bestand bzw. im Zuge von Sanierungsmaßnahmen an haustechnischen Anlagen, die gegenüber dem Rohbau in der Regel kürzere Erneuerungszyklen aufweisen, muss darüber hinaus nachgegangen werden. Hierfür bieten die hier bereitgestellten spezifischen Stoffkennzahlen einen ersten Zugang.

Tabelle A-8--7: Deutschland: Kupferlager 2005, Kupferströme 2020 (eigene Hochrechnung)

Kupfer Deutschland [Mg]	Kupferlager (2005) (Mg)	Kupferströme (2020) (Mg/a) ⁷³	
		Output	Input
Wohnen	2.615.329	6.122	16.916
Gewerbe	keine Werte	7.009	16.164
Gesamt	keine Werte	13.131	33.081

⁷³ Die Verhältnisse der für 2020 angenommenen Bautätigkeit unterscheidet sich nur moderat von den Verhältnissen, die heute anzutreffen sind, so dass die Werte für 2020 näherungsweise auch heutige Verhältnisse widerspiegeln.

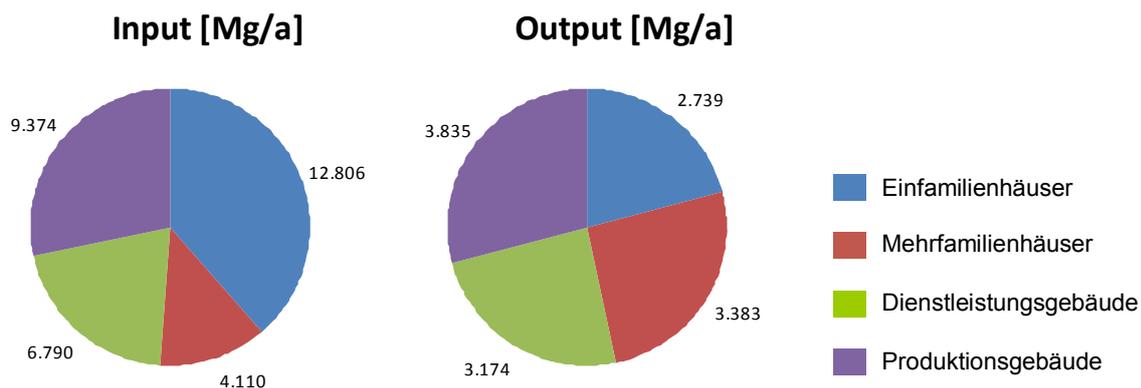


Abbildung A-8-1: Input und Output von Kupfer in und aus dem Gebäudebestand (2020), die durch Bestandsveränderungen (Zugang und Abgang von Gebäuden) ausgelöst werden, eigene Hochrechnung unter Verwendung der in Anlehnung an Wittmer (2006) formulierten spezifischen Stoffkennwerte

Was die Gewinnung von Kupfer aus dem Materiallager des Gebäudebestandes im Zuge von Abbruchmaßnahmen anbelangt geben jüngere Untersuchungen aus Österreich (Daxbeck et al. 2008) interessante Aufschlüsse. Bezogen auf ihren anthropogenen Gehalt an elementarem Kupfer im Bereich von ca. 0,2-1,3 Mass.-% bilden Baurestmassen im Vergleich zu porphyrischen Kupfererzen als den kupferhaltigen Naturvorkommen mit der größten Ausdehnung und Reichweite (Fricker et al. 2008) eine durchaus gleichwertige oder sogar ergiebigere Rohstoffquelle. Die besten Möglichkeiten, den überwiegenden Anteil des eingebrachten Kupfers beim Abbruch von Bausubstanz wieder zu gewinnen, bietet der selektive Rückbau. Hierbei kann die Erfassung von Bauteilen aus Kupfer und vor allem die von Kupfer welches in der Elektroverkabelung vorliegt, gezielt erfolgen. Mit einer derart vorgenommenen Entnahme reduziert sich für die restliche Bauwerkssubstanz der Gehalt an Kupfer auf ein Niveau, bei dem sich eine kupferorientierte Aufbereitung praktisch nicht mehr anbietet. Bei einer diesbezüglich geführten Pilotuntersuchung waren dies lediglich 7,9 Mg/kg. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Ausschleusung von Kupfer aus dem Materialstrom einer Bauschutttaufbereitungsanlage nur sehr eingeschränkt gelingt und selbst bei hohem Aufwand nur zur Rückgewinnung von etwa der Hälfte der insgesamt eingebrachten Kupfermenge führt.

Wie beim Massenbaustoff Beton, so stellt auch beim Einzelbaustoff Kupfer eine hochwertige, möglichst an den Anfang der Recyclingkette gesetzte Rohstofffassung ein wesentliches Kriterium zur Schließung von Stoffkreisläufen dar. Ein geeigneter Ausgangspunkt bietet sich in beiden Fällen mit dem selektiv betriebenen Rückbau von Gebäudesubstanz.

Anlage 9: Überschlagsrechnung Stahl

Unter Verwendung der spezifischen Baustoffkennwerte für Wohngebäude (s. Kapitel 3.1) und der dieser Studie zugrunde liegenden Angaben zum Wohnungsbestand (s. Abschnitt 2.2.3.1) sowie den zukünftigen Bestandsveränderungen (s. Abschnitt 5.1.2) wurde eine überschlägige Schätzung des Baustofflagers sowie der Stoffflüsse aus Wohnungszugang durch Neubau und Wohnungsabgang durch Abriss vorgenommen, deren Ergebnisse nachfolgend in dieser Anlage zusammengefasst sind.

Im Wohnungsbestand (Rohbau) sind nach den vorgenommenen Hochrechnungen derzeit rund 100 Mio. Tonnen an Stahl verbaut (überwiegend Baustahl⁷⁴). Dies entspricht in etwa einem Prozent des gesamten Baustofflagers des Wohnungsbestandes (s. Abschnitt 3.2) (s. Tabelle A-9-1).

Tabelle A-9-1: Stofflager Stahl (Rohbau), Masse in Mio. t , Bezugsjahr 2005

Raumbezug	Stofflager Stahl (Rohbau), Masse in Mio. t , Bezugsjahr 2005	
	Stahl	sonstige Metalle ⁷⁵
Deutschland gesamt	103,3	4,1
Westdeutschland	86,0	3,4
Ostdeutschland	17,3	0,6
RT1 Kernstädte West	24,4	0,8
RT2 Ländl Kreise West	18,0	0,7
RT3 Suburbane Kreise West	43,6	1,9
RT4 Kernstädte Ost	3,0	0,1
RT5 Periphere Räume Ost	12,3	0,5
RT6 Suburbanisierungskreise Ost	2,1	0,1

Das in dem in Abschnitt 3.2 ausgewiesenen Baustofflager der Summenposition „Metalle“ weicht geringfügig von den in dieser Tabelle aufgeführten ab. Grund hierfür ist, dass in der Hochrechnung aus Abschnitt 3-2 Alu-Rahmen der Fenster unter der Position „Sonstige Baustoffe“ aufsummiert sind (der Zuordnung der Ausgangsdaten geschuldet). In der hier vorgenommenen Hochrechnungen sind diese Metalle den „sonstigen Metallen“ zugerechnet.

Die geschätzten Stoffflüsse des Baustoffs Stahl, die durch Zugang und Abgang ganzer Wohngebäude mittelfristig und langfristig unter den angenommenen Bestandsveränderungen ausgelöst werden, sind nachfolgender Zusammenstellung zu entnehmen. In den Zahlen nicht enthalten sind die Stoffströme (und Lager) der Metalle des Ausbaus (Haustechnik).

⁷⁴ Weitere Einsatzbereiche wie Beschläge oder Rispenbänder liegen bei einem Anteil von deutlich unter einem Prozent, gemessen am kalkulierten Gesamtstahllager

⁷⁵ Aluminium, Titanzinkblech

Tabelle A-9-2: Stoffflüsse Stahl (aus Neubau und Abriss ganzer Wohngebäude), Masse in Tausend Tonnen/Jahr (gerundet)

Raumbezug	Stoffflüsse Stahl (aus Neubau und Abriss ganzer Wohngebäude), Masse in Tausend Tonnen/Jahr (gerundet)			
	2020		2050	
	Zugang (Neubau)	Abgang (Abriss)	Zugang (Neubau)	Abgang (Abriss)
Deutschland gesamt	640	350	330	870
Westdeutschland	590	200	290	710
Ostdeutschland	50	150	40	150

Für den Nichtwohnungsbereich können mit den verfügbaren Daten bislang keine entsprechenden Schätzungen vorgenommen werden. Zum Einen ist der Kenntnisstand zur Beschreibung des Nichtwohngebäudebestandes noch nicht ausreichend, zum anderen fehlen ausreichend gesicherte Erkenntnisse zu spezifischen Baustoffkennwerten für den Baustoff Stahl für Nichtwohngebäude. Hier sind die Einsatzbereiche des Baustoffs Stahl vielfältiger, so spielt hier beispielsweise Stahl auch als tragendes Konstruktionselement eine Rolle, im Gegensatz zum Wohnungsbau, wo dies eher Randerscheinungen sind. Um hier zu vertretbaren Aussagen zu kommen, sind weitere Forschungsanstrengungen erforderlich⁷⁶.

⁷⁶ Ist Gegenstand aktueller Forschungsaktivitäten des IÖR